



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 51, Nro. 2, Mayo · Julio 2023



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA

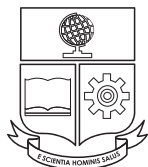


EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 51, Nro. 2, Mayo · Julio 2023



revistapolitecnica.epn.edu.ec
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. Hebertt Sira-Ramírez
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

**Vicerrectora de Investigación,
Innovación y Vinculación**
Alexandra Alvarado, Ph.D.

Rectora
Florinella Muñoz, Ph.D.

Vicerrector de Docencia
Iván Bernal, Ph.D.

Editorial

Los retos de la ciencia ante fenómenos naturales

Con periodicidad alarmante, se observa en titulares nacionales e internacionales que desastres naturales ocurren diariamente en el mundo. Estos fenómenos afectan de forma considerable al desarrollo económico de cada región y generan pérdidas humanas invaluable. De forma anual, en el Ecuador se registran 800 deslizamientos de tierra, seguido de aluviones, hundimientos o socavones. Uno de los últimos eventos de 2023, se desarrolló en la ciudad de Alausí, provincia de Chimborazo-Ecuador, que dejó más de 35 fallecidos y 55 desaparecidos.

Algunos de estos fenómenos naturales pudieron ser identificados y previstos antes de su aparición; mediante un análisis de eventos, evaluación de riesgos y la propuesta de medidas de mitigación de su impacto. Es claro que, una distribución de recursos con mayor proporción direccionada a la prevención de desastres que hacia el manejo de desastres, permitirá una mayor optimización de recursos y una disminución de pérdidas económicas, productivas y humanas.

De esta manera, se generan nuevos y constantes retos para la comunidad científica que deberán estar enfocados en medidas de prevención que posibiliten la reducción de los efectos negativos de fenómenos naturales, a través de soluciones efectivas, que consideren aspectos como identificación de riesgos, vulnerabilidad, planificación y concientización ambiental. La transferencia tecnológica, programas de investigación, innovación y divulgación científica en relación con esta problemática propiciará el desarrollo de nuevas tecnologías y herramientas que incentiven el intercambio de información y la generación de nuevos conocimientos para la reducción de riesgos de catástrofes. Para un trabajo exitoso, es necesario que tanto la academia como los tomadores de decisiones mantengan claros canales de comunicación con la finalidad de que las nuevas propuestas sean integradas oportunamente en políticas de acción de cada región.

Alineados con esta estrategia, la Revista Politécnica incluye los artículos más relevantes en el ámbito científico, seleccionados bajo los estrictos criterios de revisión que se llevan a cabo en cada publicación y presenta en su nuevo Número, tres artículos enfocados en medidas de prevención de riesgos y soluciones efectivas ante desastres naturales dentro del área de ingeniería civil. Los siete artículos restantes corresponden a las áreas de Sistemas, Química, Petróleos y Económicas. Queremos agradecer a nuestros lectores que cada día consideran a la Revista Politécnica como una referencia en sus investigaciones. Estamos seguros de que el contenido de estos manuscritos logrará cautivar el interés de investigadores, docentes y estudiantes en sus actividades propias.

El Comité Editorial de la Revista reitera el agradecimiento a la confianza de la comunidad científica. Estamos comprometidos como equipo para continuar elevando los estándares de rigurosidad y calidad, con el objetivo de impactar en contextos internacionales.

Editorial

The challenges of science in the face of natural phenomena

With alarming frequency, we see in national and international headlines that natural disasters occur daily around the world. These phenomena considerably affect the economic development of each region and generate invaluable human losses. Every year, 800 landslides are recorded in Ecuador, followed by alluvium, subsidence or sinkholes. One of the last events of 2023 took place in the city of Alausí, province of Chimborazo-Ecuador, which left more than 35 dead and 55 missing.

Some of these natural phenomena could be identified and predicted before their appearance; through an analysis of events, risk assessment and the proposal of measures to mitigate their impact. A distribution of resources with a greater proportion directed towards disaster prevention than towards disaster management, will allow a greater optimization of resources and a reduction in economic, productive and human losses.

In this way, new and constant challenges are generated for the scientific community that should be focused on prevention measures that make it possible to reduce the negative effects of natural phenomena, through effective solutions that consider aspects such as risk identification, vulnerability, planning and environmental awareness. Technology transfer, research, innovation, and scientific dissemination programs in relation to this problem will allow the development of new technologies and tools that encourage the exchange of information and the generation of new knowledge for the reduction of catastrophe risks. For a successful work, it is necessary that both the academy and the decision makers maintain clear channels of communication so that the new proposals are timely integrated into the action policies of each region.

Aligned with this strategy, Revista Politécnica includes the most relevant articles in the scientific field, selected under the strict review criteria carried out in each publication and presents in its new Issue, three articles focused on risk prevention measures and solutions effective against natural disasters within the area of civil engineering. The remaining seven articles correspond to the areas of systems, chemistry, oil and economics. We want to thank our readers who every day consider Revista Politécnica as a reference in their research. We are sure that the content of these manuscripts will captivate the interest of researchers, professors, and students in their own activities.

The Editorial Committee of the Journal reiterates its gratitude to the trust of the scientific community. We are committed as a team to continue raising the standards of demand and quality, with the aim of having an impact in international contexts.

Contenido
Vol. 51, No. 2
Mayo - Julio 2023

7

Palacios, Patricio; Celi, Carlos

Análisis de Fragilidad de una de las Tipologías Estructurales más Relevantes de la Ciudad de Quito. Proyecto TREQ-GEM

Fragility Analysis of One of the Most Relevant Structural Typologies in Quito. TREQ-GEM Project

19

Añasco, Cesar; Morocho, Karen; Hallo, María

Using Data Mining Techniques for the Detection of SQL Injection Attacks on Database Systems

Uso de Técnicas de Minería de Datos para la Detección de Ataques de Inyección de SQL en Sistemas de Bases de Datos

29

Molina, Pamela; Silva, Gabriela; Valle, Vladimir; Aldás, María-Belén; Proaño Erick

Study of Polylactic Acid – Achira Starch Blends Compatibilized by Polyvinyl Alcohol

Estudio de Mezclas Ácido Poliláctico – Almidón de Achira Compatibilizadas con Polivinil Alcohol

39

Rojas, Juan; Zúñiga, Libys

**Adaptación Planificada de las Viviendas Tradicionales ante Eventos Hidrometeorológicos
Extremos en los Pueblos Originarios en el Gran Chaco Boliviano**

*Planned Adaptation of Traditional Dwellings to Extreme Hydrometeorological Events in
Indigenous Peoples in the Bolivian Gran Chaco*

53

Morales-Oñate, Víctor; Morales-Oñate, Bolívar

MTest: a Bootstrap Test for Multicollinearity

MTest: una Prueba bootstrap para Multicolinealidad

63

Angulo-Cornejo, Jorge; Delgado-Villanueva, Jenny

**Preparación y Caracterización de Complejos de Curcumina con Zinc(II), Níquel(II),
Magnesio(II), Cobre(II) y su Evaluación Frente a Bacterias Grampositiva y Gramnegativa**

*Preparation and Characterization of Curcumin Complexes with Zinc(II), Nickel(II),
Magnesium(II), Copper(II) and their Evaluation Against Gram-positive and Gram-negative
Bacteria*

73

Delgado, Olga; Barrera, Jorge

Determinantes del Uso de Efectivo en América Latina

Determinants of Cash Use in Latin America

87

Játiva, Jefferson; Torres, Ivett; Hernández, Luis; Arévalo, Diego

**Estudio del Reforzamiento de Mampostería de Bloque de Hormigón mediante Ensayos
Destructivos Aplicados a Pórticos de Acero con Juntas Apernadas**

*Study of the Reinforcement of Concrete Block Masonry through Destructive Tests Applied to
Steel Frames with Bolted Joints*

99

Ronceros, Cristhian; Pomblas, Ramón; Salazar, José

**Automatización del Sistema de Deshidratación de Crudo Mediano de una Estación de
Flujo**

Automation of the Medium Crude Dehydration System of a Flow Station

113

Caiza, Julio C.; López, Gabriel; Guamán, Danny S.

**Elementos Reusables para Experimentar con Metodologías Basadas en Estrategias y
Patrones de Privacidad**

*Reusable Elements for Experimenting with Methodologies Based on Strategies and Privacy
Patterns*

Análisis de Fragilidad de una de las Tipologías Estructurales más Relevantes de la Ciudad de Quito. Proyecto TREQ-GEM

Palacios, Patricio¹ ; Celi, Carlos² 

¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Sangolquí, Ecuador

²Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Departamento de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador

Resumen: Esta investigación presenta los resultados de los análisis estáticos no lineales de las distintas combinaciones probables para la evaluación de la vulnerabilidad de estructuras de cuatro a seis pisos que tienen una forma irregular en planta con entrepisos de hormigón hecho in situ y conformadas por pórticos rellenos con mampostería. Se obtuvieron curvas de capacidad teóricas y estas fueron sometidas a varios escenarios sísmicos definidos en la Norma Ecuatoriana de Construcción, para los periodos de retorno comprendidos desde 25 hasta 475 años en intervalos de 10 años, con variaciones de suelo tipo C y D. No se buscó determinar los modos de falla de la tipología sino el comportamiento global estructural, con el fin de utilizar esta información en los cálculos de riesgo del Distrito Metropolitano de Quito, con base en las curvas de fragilidad que se generaron. Las curvas de fragilidad mostraron que para un control basado en la deriva máxima permitida por la Norma Ecuatoriana de Construcción del 2%, se presentaron probabilidades predominantes del 95% de igualar o exceder el límite de daño completo, por lo que se busca concientizar sobre las intervenciones estructurales pre-evento sísmico, como reforzamientos o estrategias de mitigación de daño por parte de las autoridades gubernamentales.

Palabras clave: Curvas de capacidad, análisis no lineal, curvas de fragilidad, vulnerabilidad, riesgo, Monte Carlo

Fragility Analysis of One of the Most Relevant Structural Typologies in Quito. TREQ-GEM Project

Abstract: This research presents the results of nonlinear static analyses of different probable combinations for the vulnerability assessment of four to six story structures with an irregular plan shape with cast-in-place concrete slabs made up by masonry-filled frames. Theoretical capacity curves were obtained and tested to several seismic scenarios defined in the Ecuadorian Construction Code for return periods ranging from 25 to 475 years at 10-year intervals, with type C and D soil variations. The aim was not to determine the failure modes of the typology but the overall structural behavior, in order to use this information in the risk calculations of the Metropolitan District of Quito, based on the fragility curves generated. The fragility curves showed that for a control based on the maximum drift allowed by the Ecuadorian Construction Code of 2%, there were predominant probabilities of 95% of equaling or exceeding the full damage limit, so the aim is to raise awareness to government authorities of pre-seismic structural interventions, such as reinforcements or damage mitigation strategies.

Keywords: Capacity curves, non-linear analysis, fragility curves, vulnerability, risk, Monte Carlo

1. INTRODUCCIÓN

En el proyecto de Comunicación y Formación en la Evaluación de Riesgos por Terremotos, TREQ por sus siglas en inglés, de la Fundación Global Earthquake Model (GEM), existe la necesidad de realizar evaluaciones detalladas de amenaza y riesgo de tres ciudades latinoamericanas, como son Quito (Ecuador), Cali (Colombia) y Santiago de los Caballeros (República Dominicana), con el fin de que estas evaluaciones provoquen un impacto directo en las autoridades con respecto a la comunicación e implementación de medidas de reducción

del riesgo de desastres, mediante la toma de decisiones y el desarrollo de políticas públicas de reducción del riesgo.

A pesar del progreso en esta materia con la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico en América del Sur con el proyecto SARA y en América Central y el Caribe con el proyecto CCA, es necesario continuar con la investigación que genere modelos de acceso libre en amenaza, exposición y vulnerabilidad, mismos que permitan la evaluación armonizada y transparente del riesgo en Latinoamérica, de tal forma que se considere pérdidas humanas y económicas a causa de los terremotos.

*ppalacios92@gmail.com

Recibido: 08/10/2022

Aceptado: 13/03/2022

Publicado en línea: 01/05/2022

10.33333/tp.vol51n2.01

CC 4.0

Varias investigaciones han aportado al modelo SARA, entre ellas, la investigación de Chicaiza (2017) donde se realizó el modelo de exposición y mapa de vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). En esta, se levantó la información geométrica estructural de una muestra representativa de las edificaciones en la ciudad, identificando las tipologías estructurales recurrentes de la muestra.

En la investigación de Celi & Pantoja (2017), se realizaron aportes al proyecto SARA con el análisis de fragilidad con base en las curvas de capacidad calculadas y las curvas de peligrosidad sísmica del o (DMQ), este análisis fue realizado para cuatro tipologías existentes en una muestra representativa de las edificaciones. Una de estas fue la **tipología 4**, que determinada bajo la taxonomía del GEM, se la conoce como (CR+CIP / LFLSINF + DUC: 4, 6) (Brzev et al., 2013).

La **tipología 4** analizada en Celi & Pantoja (2017) y en Celi et al. (2018), describe estructuras con losas planas, conformadas por pórticos de hormigón hecho in situ y rellenos con mampostería. En los resultados de fragilidad obtenidos, no fue considerada la influencia de la torsión en planta en la respuesta general de la edificación, esto puede provocar falsamente un criterio de aceptación basado en las deformaciones que se presentan en un análisis estático no lineal (Flores et al., 2018).

El objetivo de esta investigación fue realizar el análisis de fragilidad de la **tipología 4** considerando los efectos de torsión en planta con base en métodos estáticos directos. De esta forma, se plantea contestar a la hipótesis planteada sobre si la consideración de efectos de torsión en planta, presenta mayores índices de daño en los umbrales moderado, extensivo y completo en comparación a una estructura con efectos de torsión bajos.

El análisis utilizado para calcular las curvas de capacidad de los múltiples modelos matemáticos, está basado en métodos estáticos directos, donde se busca obtener una curva de capacidad luego de aplicar un patrón de fuerzas incremental a cada nodo de unión viga-columna. Este patrón está relacionado a cuatro formas de distribución de la fuerza con el fin de capturar los efectos de torsión que se buscan representar en la capacidad global.

La primera y segunda forma de fuerza incremental obedecen a las fuerzas que se determinan de manera directamente proporcional a las masas asignadas a cada nodo en los sentidos ortogonales de análisis. La tercera y cuarta forma de fuerza obedecen al modo fundamental y al segundo modo de vibración de la estructura, respectivamente. De esta forma, se reduce la incertidumbre existente al momento de caracterizar una estructura, ya que la respuesta sísmica puede estar dada por una de las posibles distribuciones de fuerza planteada en la edificación.

Este método asegura que los efectos torsionales puedan ser representados de forma matemática con mayor aproximación que con un método estático no lineal convencional, donde la forma de fuerza es aplicada a los diferentes niveles de la edificación y por este motivo, la respuesta del piso estará dada por la consideración del diafragma horizontal, perdiendo así

información sobre la respuesta en términos de torsión en planta.

Se reconoce que muchas de las variables involucradas son altamente aleatorias, como las características estructurales y la respuesta del sistema, especialmente cuando el comportamiento de este último es no lineal (Vargas et al., 2013). Por lo que en la evaluación de la vulnerabilidad fue necesario considerar la aleatoriedad de las variables que describen el problema mediante el uso de técnicas avanzadas basadas en el proceso de simulación de Monte Carlo y los resultados de los análisis previamente indicados.

El aporte de la Entidad Colaborada de Proyectos del Colegio de Arquitectos del Ecuador CAE-P, a través de su Director General, permitió obtener información estructural y arquitectónica sobre diez proyectos que ingresaron a revisión y que forman parte de la tipología en análisis, con el fin de definir los márgenes de variación de las variables. Estos diez proyectos fueron la base para las permutaciones que se generaron mediante variaciones a las longitudes de vanos y alturas de piso, variaciones de las propiedades mecánicas de los materiales como hormigón, acero y mamposterías. También, se realizaron variaciones de la ubicación en planta y elevación de la mampostería dentro de cada modelo, así se obtuvo una base de datos densa que permitió obtener curvas de capacidad para caracterizar a la **tipología 4**. Este proceso fue iterativo hasta encontrar estabilidad en la variabilidad de las curvas de capacidad.

La amenaza sísmica fue determinada mediante la obtención de los espectros con base en las aceleraciones máximas esperadas en el estrato competente PGA (Peak Ground Acceleration), por sus siglas en inglés, para los periodos de retorno desde 25 a 475 años en intervalos de 10 años con variaciones de suelo tipo C y D.

Se determinó gráficamente el punto de intersección del espectro de capacidad de la estructura con el espectro de demanda. En el caso de existir este punto teórico, este tuvo su aporte para el análisis de fragilidad de la tipología estudiada mediante la metodología Hazus (Kircher et al., 2006).

Con el método indicado y aplicado en las decenas de permutaciones generadas, se pudo determinar de manera objetiva los umbrales de daño que permitieron generar las curvas y matrices de fragilidad a partir del cálculo del daño asociado al comportamiento sísmico, aplicando procedimientos probabilistas a partir de resultados de análisis deterministas (Vielma et al., 2007).

Este trabajo es una contribución al análisis de fragilidad con base en métodos estáticos directos de las edificaciones pertenecientes a la **tipología 4** y aporta al análisis del riesgo sísmico en un área urbana situada en una zona de alta sismicidad enmarcado en el proyecto de la Fundación GEM.

2. ALCANCE

A partir de la información compartida por el CAE-P, se realizaron doscientos cincuenta y ocho (258) modelos

matemáticos, que se dividieron en tres (3) grupos de ochenta y seis (86) modelos para estructuras de cuatro (4), cinco (5) y seis (6) pisos, respectivamente. De esta cantidad, se trabajó solamente con los modelos que permitieron encontrar una tendencia aceptable en la dispersión de los resultados.

3. MODELOS DE MATERIALES

Se presentan los resultados de la investigación realizada en el estado del arte actual para la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales, presentando los parámetros a utilizar y el modelo adoptado para el hormigón, acero y mampostería. No fue la intención realizar una revisión cronológica de los modelos publicados y validados, sino utilizar los resultados concluyentes de las investigaciones realizadas y aplicables al medio.

Estas propiedades de elementos serán utilizadas en la modelación que se la realizó en el programa SeismoStruct versión estudiantil (Seismosoft, 2020), mediante la consideración de que la plasticidad del miembro se distribuye a lo largo de cada una de las secciones de integración empleadas y el nivel de esfuerzo y daño es determinado por la discretización de estas secciones.

3.1 Hormigón

El modelo seleccionado para el hormigón fue el no lineal de Mander, con la denominación “con_ma” en el software, mismo que trata de un modelo de confinamiento constante no lineal uniaxial que sigue la relación de constitutiva de Mander et al. (1988) y las definiciones cíclicas propuestas por Enrique Martínez-Rueda & Elnashai (1997).

La ventaja del uso de la curva constitutiva para hormigón no confinado propuesta por Mander et al. (1988), basada en el modelo de Popovics (1973), es la facilidad de representar la gráfica del hormigón confinado mediante el uso del coeficiente k . Este asume una presión de confinamiento constante a lo largo de todo el rango tensión-deformación que puede alcanzar en la zona del núcleo confinado por la presencia del refuerzo trasversal.

3.2 Acero

El modelo seleccionado para el acero fue el no lineal de Dodd y Restrepo, con la denominación “stl_dr” en el software, ya que este mostró las mejores aproximaciones en los ensayos realizados por Pachano (2018) y Albuja & Pantoja (2017). Este modelo de acero uniaxial formulado por Dodd & Restrepo-Posada (1995) considera la reducción del módulo de descarga con la deformación unitaria plástica.

3.3 Mamposterías

El modelo adoptado para las mamposterías de relleno se basa en la investigación realizada por Pachano (2018) y Albuja & Pantoja (2017) donde se utilizan los resultados obtenidos en las calibraciones de modelos mediante el software SeismoStruct v2020 (Seismosoft, 2020) y el empleo del modelo de puntales de Crisafulli (1997).

Estas simplificaciones son válidas desde el punto de vista global de toda la estructura, ya que el puntal que se utilizó no tiene la capacidad de reproducir los efectos que tiene la zona de contacto panel-marco. Aun así, este modelo cumple con el alcance del presente trabajo de investigación, debido a que no interesa verificar la especificidad de los modos de falla locales, sino la capacidad de la estructura a nivel global, por lo que, el modelo fue adecuado.

El modelo de puntales de Crisafulli (1997) se encuentra implementado en el programa SeismoStruct (Seismosoft, 2020). Este permitió obtener resultados con buenas aproximaciones al material y comportamiento de mamposterías locales. Este modelo no fue capaz de representar la interacción local entre el pórtico y la mampostería, puesto que la losa se deforma sin ningún tipo de restricción vertical en el centro del vano.

Cada una de las secciones de integración de los elementos estructurales utilizados está compuesta por elementos de tal forma que cada uno de estos responda de manera independiente según el nivel de esfuerzo y daño acumulado que tengan (Pachano, 2018).

La cantidad de secciones de integración y las fibras internas de cada elemento son utilizados con base en la experimentación en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, de los trabajos de investigación de Pachano (2018) y Albuja & Pantoja (2017), estos modelos fueron calibrados según los resultados obtenidos.

4. DESCRIPCIÓN DE LA TIPOLOGÍA 4

La **tipología 4** comprende edificaciones de cuatro a seis pisos con un sistema resistente a carga lateral basado en pórticos de hormigón, estos se encuentran rellenos en su mayoría por mampostería no confinada, la cual provoca un comportamiento estructural diferente al que se obtendría si se considera solamente el aporte de los pórticos; el sistema de entrepiso está basado en losas macizas de hormigón donde se encuentran las vigas embebidas.

Esta tipología presenta predominantemente una falla frágil en la base de las columnas toda vez que las mamposterías alcanzan su capacidad límite ante la sollicitación sísmica, debido a la baja relación de rigidez entre vigas y columnas, la reducida capacidad a cortante de las secciones y la distribución irregular de mamposterías en planta, según indica Celi & Pantoja (2017).

Se puede atribuir este comportamiento también a las consideraciones tradicionales de que el pórtico estructural es la cual gobierna el comportamiento global de la estructura, cuando realmente es la mampostería que tiene una gran influencia en el resultado final de desempeño estructural.

En la Figura 1, se puede observar algunas de las variaciones de los modelos matemáticos que fueron realizadas. Se colocó una distribución irregular de la mampostería con el fin de capturar los efectos de torsión en planta. Esta distribución obedece a

parámetros aleatorios de colocación de los paneles de relleno, por lo que, luego de un proceso de filtrado se escogió las curvas que se apeguen a la realidad y presenten un comportamiento sin decaimientos de capacidad bruscos.



Figura 1. Tipología 4. Variación de modelos (Modelo 056 & Modelo 233)

En la Tabla 1, se presentan las propiedades de los modelos 056 y 233 indicados en la Figura 1. Esta tabla muestra cómo se realizaron las variaciones de propiedades geométricas y mecánicas en las permutaciones generadas a partir de la información facilitada por el CAE-P. La distribución de las mamposterías obedece a un algoritmo aleatorio de colocación en planta y elevación, luego de este proceso se revisó cada modelo con el fin de conservar únicamente los que tienen una distribución similar a la que se utiliza en las estructuras reales.

Tabla 1. Propiedades de modelo 056 y modelo 233

Propiedad	Modelo M056	Modelo M233
Vector Lx [m]	6.0 - 5.0 - 6.0	6.0 - 5.0 - 6.0
Vector Ly [m]	4.0 - 4.0 - 4.0	4.0 - 4.0 - 4.0
Vector H [m]	3.0 - 2.5 - 3.0 - 2.5 - 3.0	3.0 - 2.5 - 3.0 - 2.8
Espeesor Mampostería [m]	0.15	0.15
Columnas [mxm]	0.45 x 0.45	0.55 x 0.55
Vigas [mxm]	0.40 x 0.20	0.50 x 0.20
Altura de Losa [m]	0.20	0.20
f_c [kg/cm ²]	210.00	210.00
E_c [kg/cm ²]	202879.27	202879.27
f_y [kg/cm ²]	4200.00	4200.00
E_s [kg/cm ²]	2100000.00	2100000.00
f_m [kg/cm ²]	47.93	95.85
E_m [kg/cm ²]	87491.64	174983.27
Espeesor de mampostería [m]	0.15	0.15

Las demás permutaciones, fueron realizadas mediante la variación de los parámetros indicados en la Tabla 1 y principalmente mediante la colocación aleatoria de las mamposterías tanto en planta como en elevación.

La información que se presenta a continuación fue extraída de la documentación facilitada por el CAE-P y es utilizada como punto de partida para la realización de las permutaciones. Se extrajo las dimensiones de las columnas, vigas y losas y sus correspondientes armados, sin realizar comprobaciones sobre si estas cumplen con las normativas, ya que el propósito de la investigación fue determinar el estado actual de la tipología en cuanto a vulnerabilidad sísmica mediante curvas de fragilidad.

Las dimensiones de estas secciones fueron variadas para capturar de forma objetiva la mayor cantidad de permutaciones de la tipología analizada, con el fin de representar el comportamiento estructural bajo una perspectiva paramétrica; el proceso de determinación de permutaciones de tipología se indica más adelante.

4.1 Columnas

La información facilitada por el CAE-P muestra elementos columna con una sección igual en todos los pisos y en todas las columnas de la planta, por lo que, los modelos matemáticos seguirán esta tendencia. El armado de las columnas fue considerado como el 1% del área bruta de hormigón, distribuyéndolo simétricamente con varillas de 14mm y con un sistema de estribos que se compone de varillas de 10mm con gancho sísmicos a 135° cada 0.15 m de espaciamiento. De esta forma, se trata de modelar la incertidumbre de armado de columnas con experiencias previas de evaluación estructural y con la comprobación del desempeño sísmico que se ha evidenciado en el DMQ bajo las acciones sísmicas pasadas.

4.2 Vigas

En la investigación de Chicaiza (2017), se indica que las secciones de las vigas son embebidas en las losas, por lo que, para este trabajo las alturas de estas serán de la misma altura de la losa de hormigón armado.

4.3 Losas

El sistema de entrepiso fue considerado como una losa maciza de hormigón de 0.20 m de espesor, la cual permite establecer en el análisis que el piso entero tenga desplazamientos iguales en las direcciones horizontales ortogonales como un cuerpo rígido. No se ha considerado el armado de este elemento ya que el propósito no fue obtener la contribución de la capacidad de la losa, sino modelar la influencia de este sistema de entrepiso en la respuesta estructural global referente a efectos torsionales.

5. CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Para los modelos matemáticos generados no fue necesario considerar una viga tipo T como se lo realizó en las simulaciones de Pachano (2018) y Albuja & Pantoja (2017), ya que la estructura tridimensional provee la interacción entre la losa y la viga embebida mediante las consideraciones de piso rígido.

Se incluyó elementos verticales y horizontales elásticos con el fin de obtener estabilidad estática matemática, permitiendo la transmisión de cargas hacia la cimentación. Estos elementos fueron colocados en las zonas perimetrales de las mamposterías donde no existen elementos estructurales, como en las zonas de abertura de mampostería. Estos elementos no aportan rigidez lateral al sistema y tienen dimensiones de 0.20x0.20 [mxm]. De esta forma se obtuvieron propiedades dinámicas y de rigidez coherentes entre los modelos y la realidad del DMQ.

Como resultado de la investigación estadística de Parra & Sarango (2016), se concluyó que la ecuación simplificada para determinar el periodo fundamental aproximado de 152 edificios de hormigón armado, regulares y no adosados del DMQ es la ecuación (1).

$$TL = \frac{H}{51} \quad TT = \frac{H}{45} \quad (1)$$

Como ejemplo, se indica que para el modelo 003 de esta investigación, que posee una altura de 12.5 [m], esta ecuación resulta en 0.245 [s] como periodo en la dirección longitudinal y 0.277 [s] para la dirección transversal. Por otro lado, la ecuación de la NEC (NEC-SE-DS, 2015) que se muestra en la ecuación (2), con $C_t = 0.055$ y $\alpha = 0.9$, resulta un valor de 0.534 [s] para el mismo modelo 003, el cual no refleja la realidad de las edificaciones medidas en el estudio de Parra & Sarango (2016).

$$T = C_t h_n^\alpha \quad (2)$$

En esta investigación, no se realizó ninguna toma de datos para la calibración del periodo estructural mediante ensayos de vibraciones ambientales, ya que el propósito fue realizar un análisis que permita absorber la variabilidad de toda la tipología en cuanto a materiales, secciones y geometría. Si se comprobó que las relaciones de rigidez y masas sean consistentes con la realidad del DMQ, comparando los periodos elásticos teóricos con los ensayados y tabulados por Perrault et al., (2020), con el fin de permanecer en un rango aceptable para la caracterización de los modelos realizados, considerando la variabilidad introducida en la modelación estructural. Estos resultados se muestran en la Figura 2.

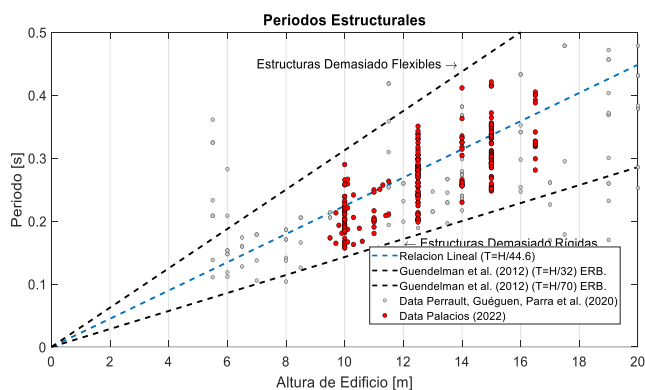


Figura 2. Calibración de periodos elásticos estructurales

6. CURVAS DE CAPACIDAD

Con los modelos calibrados y ajustados a la realidad de la ciudad mediante la selección de curvas que no tengan caídas repentinas de capacidad y eliminación de modelos estructurales que presentan distribuciones de mamposterías no convencionales, se procedió a calcular las curvas de capacidad de los modelos evaluados, escogiendo la máxima, media y mínima como indica la Figura 3. Se pueden observar también las curvas de capacidad de todas las permutaciones aceptadas para las tipologías de cuatro (4), cinco (5) y seis (6) pisos considerando el análisis de distribución de fuerzas según el modo fundamental de vibración.

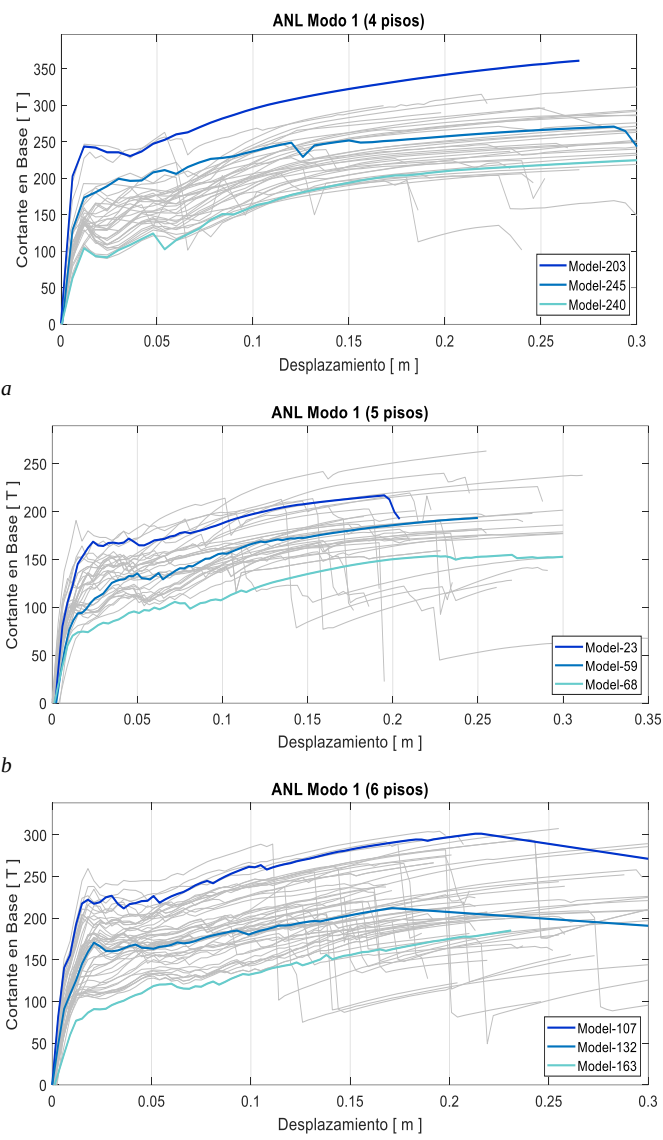


Figura 3. Curvas de capacidad máxima, mínima y media para análisis de distribución de fuerzas según primer modo de vibración. a) Variación cuatro pisos. b) Variación de cinco pisos. c) Variación de seis pisos.

Con la consideración de cálculo de curvas de capacidad obtenidas mediante las demás distribuciones de fuerzas planteadas y los resultados de las curvas máximas, medias y mínimas, se puede proponer los umbrales de daño que se indican en la

Tabla 2, estos fueron determinados mediante un análisis punto a punto de las curvas de capacidad y la evaluación de cuando se alcanzó un nivel de desempeño que caracterice al umbral de daño seleccionado. Estos umbrales de daño fueron basados en el desplazamiento último du que es caracterizado por el estado de daño “Completo”, el estado de daño “Extensivo” y “Moderado” son caracterizados por un sistema de rotulación en elementos estructurales con desempeños cercanos al colapso y seguridad de vida, según lo especificado en las tablas del ASCE 41 (2017). Finalmente, el estado de daño “Leve” fue caracterizado cuando las edificaciones alcanzaron el límite de fluencia en sus elementos estructurales.

Tabla 2. Umbrales de daño promedio propuestos

Umbrales del estado de daño	Criterio
Leve	$Sd1, ds=0.4 \cdot du$
Moderado	$Sd1, ds=0.6 \cdot du$
Extensivo	$Sd1, ds=0.8 \cdot du$
Completo	$Sd1, ds=du$

7. ESPECTROS DE PELIGRO SÍSMICO

Según Celi et al. (2016), el evento de 475 años de periodo de retorno es el evento sísmico de demanda para la filosofía de diseño sismorresistente ecuatoriana y el evento de 100 años de periodo de retorno es uno de los eventos sísmicos más probables dentro de la sismicidad histórica Quiteña, por lo que estos escenarios son considerados como límites en los intervalos de intensidades. Se realizaron variaciones al periodo de retorno para obtener diferentes valores de Z de la curva de peligro sísmico de Quito y el resultado de todos estos espectros se indica en la *b*

Figura 4.

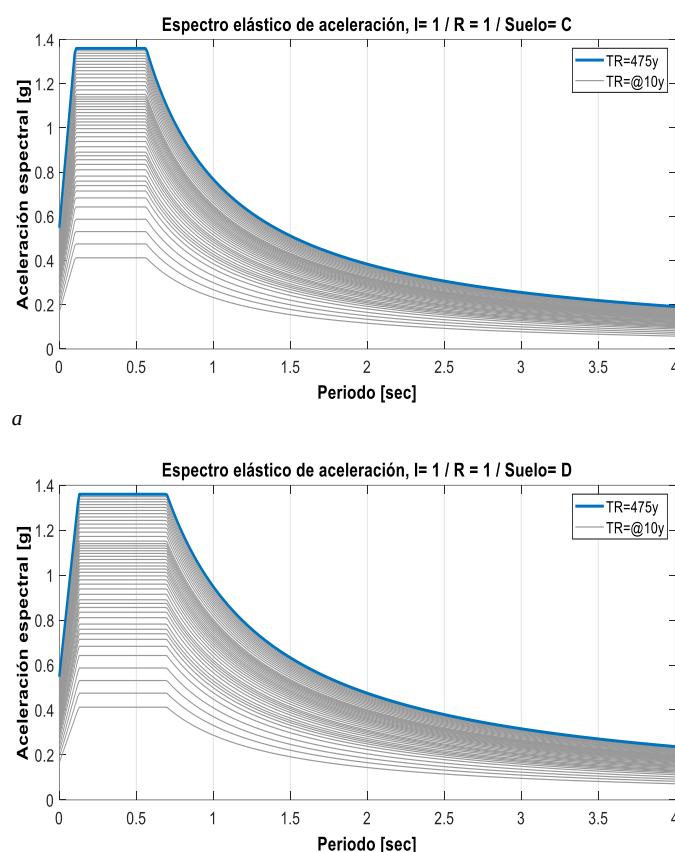


Figura 4. Variación de intensidades en espectro de respuesta de la NEC-SE-DS (2015). a) Suelo tipo C. b) Suelo tipo D

Con la variación de intensidades seleccionadas y que definen la forma espectral en la NEC-SE-DS (2015), se procede a encontrar los puntos de intersección entre el espectro de demanda y el espectro de amenaza en un espacio de coordenadas espectrales conocido como ADRS (Acceleration Displacement Response Spectra) por sus siglas en inglés y de esta forma el punto teórico de intersección entre espectro de capacidad y de demanda, aportan su contribución para la determinación de la fragilidad estructural.

8. PUNTOS DE INTERSECCIÓN ENTRE ESPECTRO DE CAPACIDAD Y ESPECTROS DE AMENAZA

Conceptualmente, el método de espectro de capacidad es un procedimiento de análisis estático no lineal que utiliza la intersección de la curva de capacidad y el espectro de respuesta reducido en un sistema de coordenadas común para calcular el desplazamiento máximo. La representación gráfica de esta intersección proporciona una idea clara de cómo la edificación responderá al movimiento del terreno por las fuerzas de origen sísmico y este fue considerado como el parámetro de medición dentro del desplazamiento espectral (Martínez, 2012).

En esta investigación, la selección del tipo de estructura bajo el ATC40 (1996) supone que la **tipología 4** debió cumplir ciertos requerimientos dados por la normativa vigente en el tiempo de construcción, pero esto no significa que la tipología posea un comportamiento con una buena disipación de energía debido a varias consideraciones, como que el código de construcción utilizado no refleja los avances de investigación en cuanto a buen comportamiento estructural que se manejan hasta la fecha actual, existe alta incertidumbre en la definición de las capacidades de los materiales estructurales y el armado que se realizó in situ y finalmente, se desconoce si existió algún control en obra. Por este motivo, se maneja una comportamiento estructural medio según las especificaciones del ATC40 (1996), es decir uno Tipo B.

El punto teórico encontrado puede darse en el rango elástico del espectro de capacidad y este resultado puede ser interpretado de dos formas, ya que la demanda del sismo es pequeña y permite que la estructura tenga aún un comportamiento elástico, o que la estructura es bastante resistente y puede mantenerse en el rango elástico para el nivel de intensidad de la sollicitación (Silva, 2018). Entendiéndose que el método especificado en el ATC40 (1996) para el grupo tipológico B puede concluir en bajas ductilidades por desplazamiento de la edificación en análisis, y esto no es coherente con la realidad visible de la tipología analizada, es necesario realizar una revisión de los resultados obtenidos especialmente para intensidades altas.

Los resultados obtenidos permitieron ejecutar el algoritmo de simulación de Monte Carlo, el cual necesita la información de entrada que son los valores de la variable de control, en este análisis se utilizó los desplazamientos espectrales obtenidos como resultado de la intersección de los espectros de capacidad con los de demanda como variable de control. Dado que para cada umbral de daño existen límites de desplazamiento, el algoritmo de Monte Carlo realiza varias simulaciones en este rango de desplazamientos hasta encontrar la función de distribución normal que permita caracterizar la fragilidad estructural.

9. RESULTADOS

Las curvas de fragilidad se definen mediante la ecuación (3), esta permite agrupar distintos niveles de desempeño representados en desplazamiento espectrales determinados ante distintos niveles de amenaza sísmica.

$$P[ds | S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (3)$$

Donde:

$\bar{S}_{d,ds}$ = Valor medio del desplazamiento espectral, en el cual la estructura alcanza el estado límite de daño, ds

β_{ds} = Desviación estándar del logaritmo natural de los desplazamientos espectrales para el estado de daño, ds

Φ = Función de distribución log-normal de la desviación estándar acumulada.

La ecuación (3) asume las siguientes hipótesis:

1) En los desplazamientos espectrales que pertenecen a los umbrales de daño calculados, la probabilidad de que se iguale o exceda el estado de daño es del 50%.

2) Las frecuencias de los diferentes resultados generados por esta simulación resultan en una distribución normal, por este motivo se puede definir el resultado mediante la media y la desviación estándar para describir como varían los resultados.

Se tomaron todas las curvas de fragilidad obtenidas para los modelos de cuatro (4), cinco (5) y seis (6) pisos que resultaron con las curvas de capacidad máximas, media y mínimas para un determinado tipo de suelo. Luego de esto, se encontró la media matemática de todas esas curvas para representar la curva final de fragilidad, esto se muestra en la en la Figura 5.

Se incluyó un valor de ± 0.5 desviación estándar con el fin de caracterizar las curvas de fragilidad de forma probabilista cuando se superen o igualen los límites de daño, aportando un valor de confiabilidad dado por la función de distribución normal. Este valor de desviación estándar adoptado demostró ser suficiente para los objetivos de la investigación, ya que utilizar valores de mayor magnitud resultan en una redundancia matemática de probabilidad de sucesión de eventos del 0 al 100%, perdiendo así el propósito de la investigación, como se indica en los resultados de la Figura 5.

Las curvas de fragilidad finales para la representación de la vulnerabilidad sísmica de la *tipología 4* se muestran en la Figura 6 para el suelo tipo C, expresadas mediante la media ($\bar{x}$) y la desviación estándar (σ). En el fondo, se pueden observar todos los resultados obtenidos que se describieron en la Figura 5. También se puede observar que se han graficado parámetros de control adicionales como los desplazamientos espectrales que resultan de la intensidad para movimiento ligero, medio y fuerte, estos corresponden a derivas globales de piso de 0.5%, 1.0% y 2.0% de la altura, respectivamente.

Se realizó el mismo procedimiento de caracterización de las curvas de fragilidad para el suelo tipo D, estos resultados se muestran en la Figura 7, expresados mediante la media ($\bar{x}$) y la desviación estándar (σ).

Finalmente, se presentan los resultados de las matrices de probabilidades de daño para la envolvente media para los tipos de suelos C y D en la Figura 8, respectivamente.

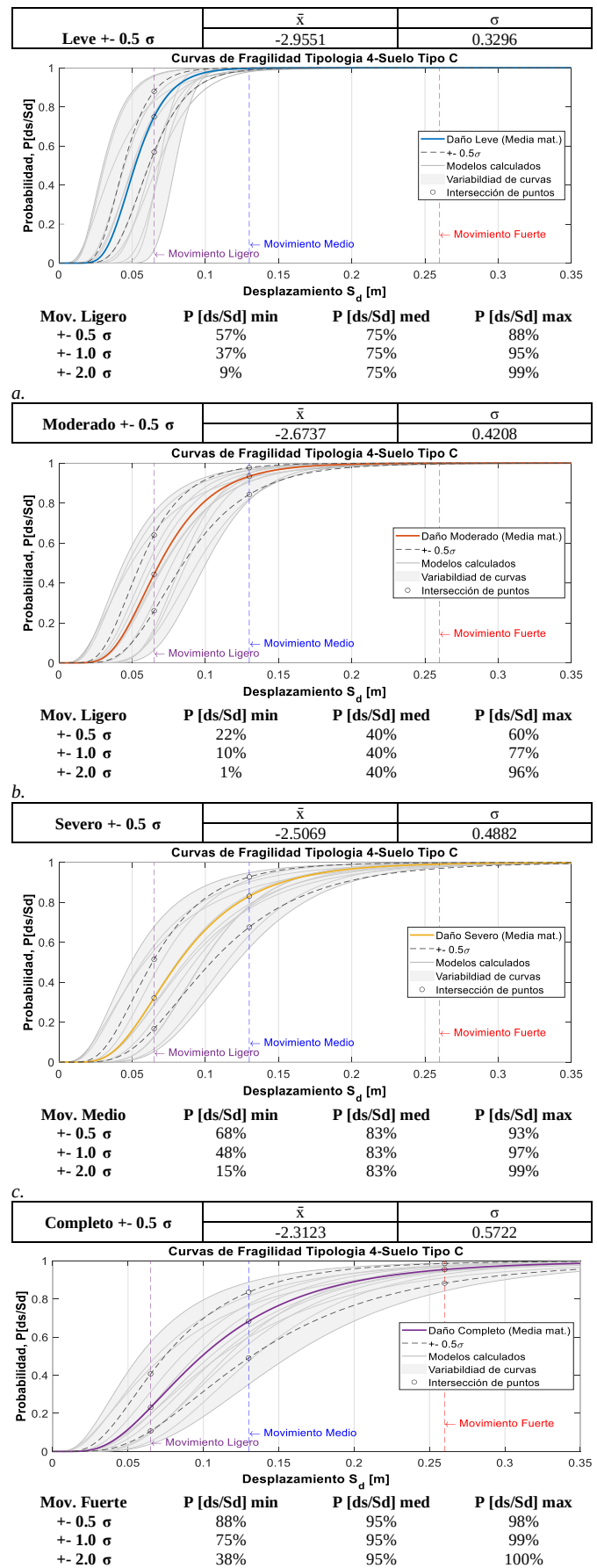
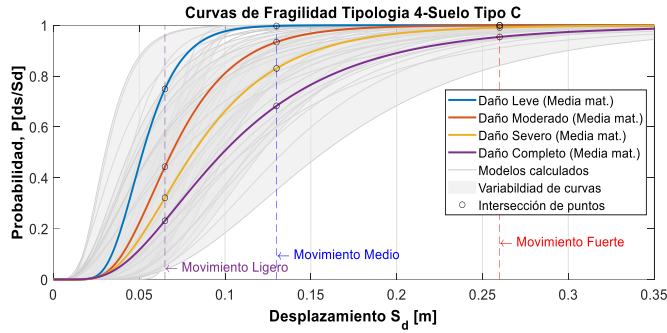


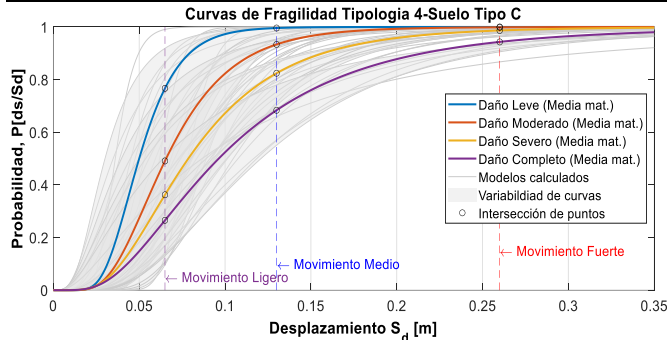
Figura 5. Curvas de fragilidad y resultados para envolvente máxima. Suelo tipo C. Daño a) Leve. b) Moderado c) Severo. d) Completo

Modelo Máximo. Suelo Tipo C.							
Leve		Moderado		Severo		Completo	
$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
-2.9551	0.3296	-2.6737	0.4208	-2.5069	0.4882	-2.3123	0.5722



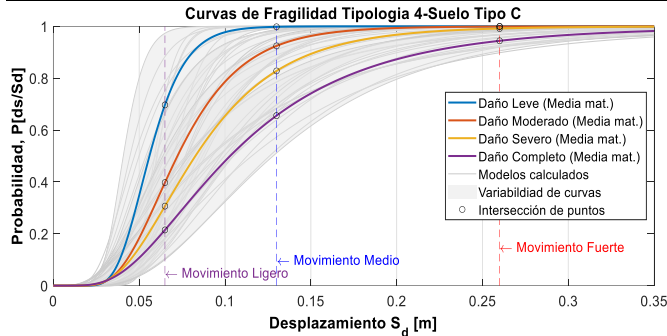
a.

Modelo Medio. Suelo Tipo C.							
Leve		Moderado		Severo		Completo	
$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
-2.9962	0.3606	-2.7231	0.4537	-2.5433	0.5397	-2.3401	0.6276



b.

Modelo Mínimo. Suelo Tipo C.							
Leve		Moderado		Severo		Completo	
$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
-2.8828	0.2897	-2.6271	0.4088	-2.4922	0.4776	-2.2735	0.5824



c.

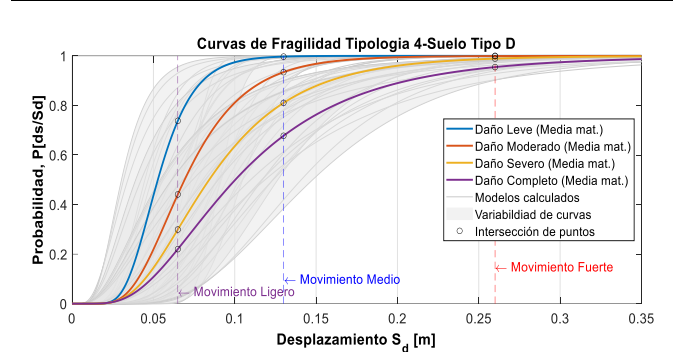
Figura 6. Curvas de fragilidad para tipología 4. Suelo tipo C. Modelo con curva de capacidad. a) Máxima. b) Media. c) Mínima

10. CONCLUSIONES

Los modelos realizados fueron validados a nivel de masas y rigidez mediante la comprobación de los periodos elásticos y su rango de variabilidad en el DMQ definido por los intervalos de 0.15 a 0.35 [s], por lo que el modelo adoptado de mampostería genera resultados estables y adecuados en cuanto a comportamiento modal de las edificaciones analizadas.

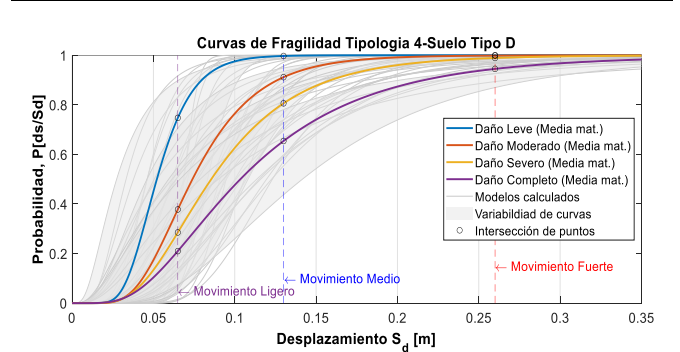
Debido a la alta sensibilidad de la función de distribución que resulta del método al punto teórico de colapso du , en las curvas de capacidad, este debe ser definido mediante un análisis

Modelo Máximo. Suelo Tipo D.							
Leve		Moderado		Severo		Completo	
$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
-2.9429	0.3291	-2.6712	0.4184	-2.4736	0.4934	-2.2993	0.5626



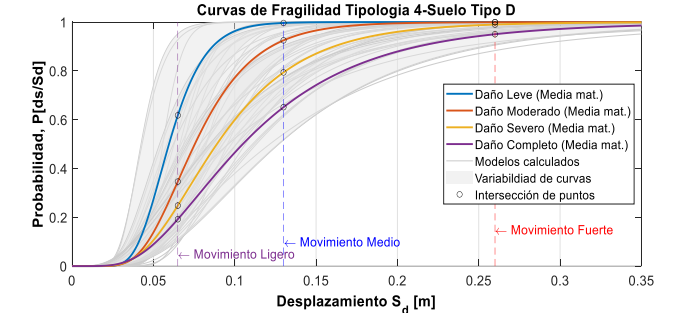
a.

Modelo Medio. Suelo Tipo D.							
Leve		Moderado		Severo		Completo	
$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
-2.954	0.3314	-2.6036	0.4172	-2.4585	0.4844	-2.2686	0.5762



b.

Modelo Mínimo. Suelo Tipo D.							
Leve		Moderado		Severo		Completo	
$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
-2.8202	0.2901	-2.5842	0.3777	-2.4188	0.462	-2.2541	0.5505



c.

Figura 7. Curvas de fragilidad para tipología 4. Suelo tipo D. Modelo con curva de capacidad. a) Máxima. b) Media. c) Mínima

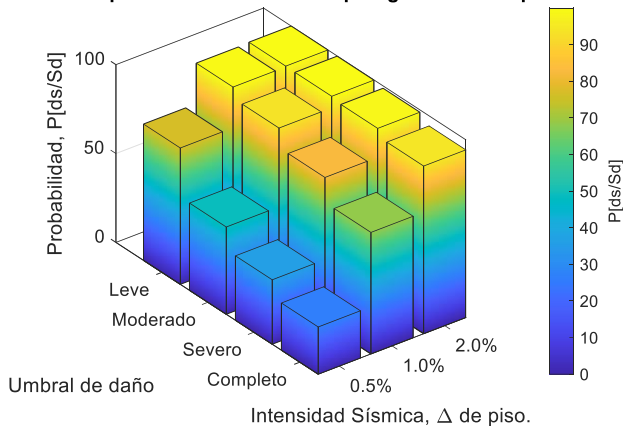
controlado por fragilidad local dentro del análisis estático no lineal.

Los umbrales de daño que se utilizan para la definición de las curvas de fragilidad deben ser calculados a partir de las propiedades intrínsecas de la tipología estructural analizada y no deben ser generalizados a partir de otros estudios.

Aunque se haya utilizado un enfoque probabilista y una disminución de la incertidumbre por la alta cantidad de modelos matemáticos creados, la naturaleza del problema global es altamente no lineal, por lo que no es posible

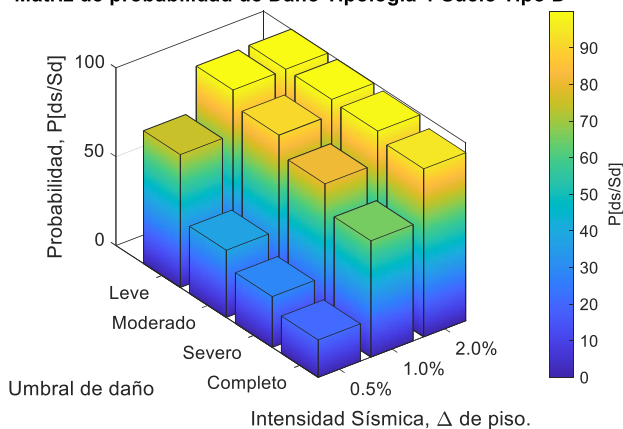
garantizar un nivel alto de confianza de la respuesta obtenida. Este es el motivo por el que se manejan probabilidades del 50% de que se igualen o se excedan los límites establecidos en las curvas de fragilidad.

Matriz de probabilidad de Daño Tipología 4-Suelo Tipo C



a

Matriz de probabilidad de Daño Tipología 4-Suelo Tipo D



b

Figura 8. Matriz de probabilidad de daño para tipología 4. a) Suelo tipo C. b) Suelo tipo D

El valor asignado de 0.5 desviación estándar, fue suficiente para representar de forma razonablemente coherente los rangos de ocurrencia de igualación o superación de los umbrales de daño definidos por las curvas de fragilidad, este valor supone un valor de confiabilidad del 65% contenido en el percentil 60.

Los resultados mostraron que para derivas globales del 0.5% de la altura de la edificación, la tipología analizada presentó probabilidades entre el 62% y el 75% de igualar o exceder el límite de daño leve, entre el 35% y el 44% de igualar o exceder el límite de daño moderado, entre el 25% y el 36% de igualar o exceder el límite de daño severo y entre el 19% y el 27% de igualar o exceder el límite de daño completo.

Se observó que para derivas globales 1.0% de la altura de la edificación, la tipología analizada presentó probabilidades predominantes del 100% de igualar o exceder el límite de daño leve, entre el 91% y el 93% de igualar o exceder el límite de daño moderado, entre el 79% y el 83% de igualar o exceder el límite de daño severo y entre el 65% y el 68% de igualar o exceder el límite de daño completo.

Las curvas de fragilidad muestran que para un control basado en la deriva máxima permitida por la Norma Ecuatoriana de Construcción del 2%, se presentaron probabilidades predominantes del 95% de igualar o exceder el límite de daño completo.

La vulnerabilidad sísmica determinada a partir de las curvas de fragilidad, para el punto de intersección entre el espectro de capacidad y el de amenaza para un periodo de retorno de 475 años, se encuentra de forma predominante en los estados de daño de moderado y severo.

Los resultados obtenidos por el análisis de fragilidad mostraron que considerar los efectos de torsión en planta, provocado por la distribución irregular de las mamposterías, resulta en mayores probabilidades de exceder límites de daño en comparación a modelos estructurales con distribución regular de mampostería, por lo que la hipótesis planteada se cumplió.

Las altas probabilidades que se encontraron para exceder el límite de daño completo en la tipología analizada concluyen en los impactos de índole económico debido al costo de reposición de las edificaciones, la paralización de actividades en los sectores afectados y la vida social de los damnificados.

AGRADECIMIENTOS

A José Poveda, por sus revisiones y al CAE-EP, por su colaboración con la información compartida para generar los modelos matemáticos.

REFERENCIAS

- Albuja, D., & Pantoja, J. (2017). *Estudio del reforzamiento de la mampostería de bloque de hormigón con malla electrosoldada mediante ensayos destructivos*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17516>
- ASCE/SEI 41. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414859>
- Applied Technology Council ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Volume 1 & 2, California, USA*.
- Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., & Silva, V. (2013). *GEM Building Taxonomy Version 2.0. GEM Technical Report*. <https://doi.org/doi:10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02>
- Celi, C., Moyano, J., Ayala Moya, C., & Sosa, D. (2016). *Capacity Curves of Structural Typologies of Quito - Ecuador, Project GEM - SARA*. July, 1–11.
- Celi, C., & Pantoja, J. (2017). *Final Report: Capacity Curves and Fragility Curves of Residential Buildings for the City of Quito*. May, 1–39. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28046.46402>
- Celi, C., Pantoja, J., Sosa, D., & Ayala, C. (2018). *Seismic Vulnerability of Quito Ecuador, Phase 1: Capacity Curves of Structural Typologies, Project Gem -Sara*.

- Revista PUCE, (106), 43–80.
<http://www.revistapuce.edu.ec/index.php/revpuce/article/view/130>
- Chicaiza, M. (2017). *Modelo de exposición y mapa de vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17352>
- Crisafulli, F. J. (1997). *Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills* [Doctoral dissertation, University of Canterbury]. UC Research Repository. <http://hdl.handle.net/10092/1221>
- Dodd, L. L., & Restrepo-Posada, J. I. (1995). Model for Predicting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel. *Journal of Structural Engineering*, 121(3), 433–445.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1995\)121:3\(433\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:3(433))
- Enrique Martínez-Rueda, J., & Elnashai, A. S. (1997). Confined concrete model under cyclic load. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 30(197), 139–147. <https://doi.org/10.1007/bf02486385>
- Flores, F., Charney, F. A., & Lopez-Garcia, D. (2018). The influence of accidental torsion on the inelastic dynamic response of buildings during earthquakes. *Earthquake Spectra*, 34(1), 21–53.
<https://doi.org/10.1193/100516EQS169M>
- Kircher, C. A., Whitman, R. V., & Holmes, W. T. (2006). HAZUS earthquake loss estimation methods. *Natural Hazards Review*, 7(2), 45–59.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2006\)7:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(45))
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804–1826.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804))
- Martínez, J. (2012). *Caracterización de la Vulnerabilidad Sísmica utilizando Curvas de Fragilidad y Matrices de Probabilidad de Daño para Algunas Tipologías Estructurales de Hormigón Armado. Aplicación a la Ciudad de Valdivia, Región de Los Ríos*. [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2012/bmfcm385c/doc/bmfcm385c.pdf>
- NEC-SE-DS. (2015). Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente. Norma Ecuatoriana de La Construcción. <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-1.pdf>
- Pachano, F. (2018). *Determinación de parámetros mecánicos para modelos no lineales de mampostería de relleno en pórticos de hormigón armado obtenidos de manera experimental* [Tesis de postgrado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19734/1/CD-9135.pdf>
- Parra, K., & Sarango, J. (2016). *Análisis estadístico del periodo experimental de vibración en edificios aporticados de hormigón armado en el Distrito Metropolitano De Quito*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/14781?locale=en>
- Perrault, M., Guéguen, P., Parra, G., & Sarango, J. (2020). Modification of the data-driven period/height relationship for buildings located in seismic-prone regions such as Quito (Ecuador). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(8), 3545–3562.
<https://doi.org/10.1007/s10518-020-00840-0>
- Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, 3(5), 583–599. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90096-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3)
- Seismosoft. (2020). SeismoStruct. A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures, 1–578.
<https://seismosoft.com/product/seismostruct/>
- Silva, R. (2018). *Desempeño sísmico de muros de quincha tradicional mediante el método del espectro de capacidad*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. PUCP.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12253>
- Vargas, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, A. H., & Hurtado, J. E. (2013). Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico de edificios de hormigón armado. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 29(2), 63–78.
<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.003>
- Vielma, J., Barbat Barbat, H., & Oller Martínez, S. (2007). Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño de edificios de concreto armado con ductilidad limitada. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 7(2), 273–286.

BIOGRAFÍA



Patricio Palacios, Ingeniero Civil Mención Estructuras de la Escuela Politécnica Nacional, es investigador en temas de amenaza sísmica y no linealidad de estructuras. Ponente en seminarios nacionales e internacionales. Autor y revisor de artículos científicos. Ha realizado Diplomados de Educación Superior para especializarse en la metodología BIM para Administración, Gerencia y Modelamiento de infraestructura Hospitalaria, Educativa y de Viviendas. Miembro participante en la actualización de la NEC2015 Capítulo: Peligro Sísmico y Diseño Sismoresistente y en el Capítulo: Riesgo y Evaluación Sísmica y Rehabilitación Estructural de Edificaciones Existentes.



Carlos Celi, Máster en Ingeniería Estructural mención SUMA CUM LAUDE de la EPN, posee más de 15 años de experiencia destacando consultorías estructurales de edificios de más de 140 m de altura; actualmente trabaja en el Facultad de Ingeniería Civil, de la Pontificia Universidad

Católica del Ecuador. Su campo de investigación es la modelación matemática no lineal. Entre sus proyectos actuales destacan: 'Aplicación de redes neuronales artificiales (ANN) en la estimación de la fragilidad local en elementos planos', 'Generación de acelerogramas sintéticos con base en teoría del Caos', 'Participa en el PRY. Training And Communication for Earthquake Risk Assessment'

Using Data Mining Techniques for the Detection of SQL Injection Attacks on Database Systems

Añasco, Cesar¹ ; Morocho, Karen¹ ; Hallo, María¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Quito, Ecuador

Abstract: In any business organization, database infrastructures are subject to various structured query language (SQL) injection attacks, such as tautologies, alternative coding, stored procedures, use of the union operator, piggyback, among others. This article describes a data mining project developed to mitigate the problem of identifying SQL injection attacks on databases. The project was conducted using an adaptation of the cross-industry standard process for data mining (CRISP-DM) methodology. A total of 12 python libraries was used for cleaning, transformation, and modeling. The anomaly detection model was carried out using clustering by the k – nearest neighbors (kNN) algorithm. The query text was analyzed for the groups with anomalies to identify sentences presenting attack traces. A web interface was implemented to display the daily summary of the attacks found. The information source was obtained from the transactions log of a PostgreSQL database server. Our results allowed the identification of different attacks by injection of SQL code above 80%. The execution time for processing half a million transaction log was approximately 60 minutes using a computer with the following characteristics: Intel® Core i7 processor 7th generation, 12GB RAM and 500GB SSD.

Keywords: Log, Database Attacks, Anomalies, Queries, CRISP-DM, IDS (Intrusion Detection Systems)

Uso de Técnicas de Minería de Datos para la Detección de Ataques de Inyección de SQL en Sistemas de Bases de Datos

Resumen: En cualquier organización empresarial, las infraestructuras de bases de datos y de almacenamiento de la información están sujetas a diversos ataques de inyección de lenguaje de consulta estructurado (SQL), tales como: tautologías, codificación alternativa, procedimientos almacenados, uso del operador unión, consultas adicionales, entre otros. Este artículo describe un proyecto de minería de datos para desarrollar una herramienta que identifique ataques a bases de datos por inyección de código SQL. El proyecto se realizó con una adaptación de la metodología de proceso estándar de la industria para la minería de datos (CRISP-DM). En el desarrollo, se usó un total de 12 librerías de Python para la limpieza, transformación y modelado. El modelo de detección de anomalías fue realizado usando agrupación mediante el algoritmo de vecinos más cercanos (kNN), y a los grupos con anomalías se realizó el análisis del texto de la consulta para identificar sentencias que indiquen un indicio de ataque. Para la visualización de los resultados de los modelos, se implementó una interfaz web, la cual despliega la estadística diaria de los ataques encontrados. La fuente de información se obtuvo de registros de transacciones del log de un servidor de base de datos PostgreSQL. El resultado obtenido permitió la identificación de diferentes ataques por inyección de código SQL por encima del 80% y el tiempo de ejecución para el procesamiento de medio millón de registros fue de aproximadamente 60 minutos, mediante una computadora con las siguientes características: procesador Intel® Core i7 de séptima generación, 12GB de RAM y disco sólido SSD de 500GB.

Palabras clave: Log, Ataques a Bases de Datos, Anomalías, Consultas SQL, CRISP-DM, IDS (Sistema de Detección de Intrusos)

1. INTRODUCTION

In any business organization, business database and storage infrastructures contain primarily sensitive data, which are targets of a wide range of attacks on their security by users seeking to take advantage of that information for different

purposes (Malik y Patel, 2016). The most common attacks are due to the wide range of vulnerabilities of databases. They are mainly due to the lack of visibility when they occur at the database level and to the scarce analysis of vulnerabilities. An example is the inadequate management of user rights and the

*cesar.anasco@epn.edu.ec
Recibido: 03/12/2021
Aceptado: 30/09/2022
Publicado en línea: 01/05/2023
10.33333/rp.vol51n2.02
CC 4.0

lack of monitoring for unauthorized access (Telefónica Company, 2015).

Modern security vulnerability detection applications must be reliable, functional, and easy to manage. In recent years, intrusion detection systems (IDS) based on data mining have demonstrated high precision, good generalization of new types of intrusion and robust behavior in a changing environment (Chetan y Ashoka, 2012). In addition, the security incident response and intrusion identification engines are gaining relevance given the growth of malware and various threats that databases are exposed to.

Research in intrusion detection methods relies on statistical models. Lee et al. (2000) analyzed log regular expressions from SQL queries to identify the normal behavior of users. Wang et.al (2020) proposed an automatic neighbor selection based on the kNN (k-Nearest Neighbors) algorithm. Making clear emphasis on showing that supervised learning methods have a higher efficiency than unsupervised methods and explaining the advantages of using a machine learning algorithm, such as kNN, for anomalies detection with massive log files. Brahma and Panigrini (2020) analyzed outlier values using data mining techniques to automate the intrusion detection process with greater precision, using data generated from database users. We consider these mentioned studies to be the primary source of our project development, we combined a hybrid approach of SQL regular expressions analysis for identifying specific types of injections and outlier detection to decrease the complexity of working with large datasets.

This paper presents the results of a project to implement a model which identifies SQL code injection attacks through the analysis of various PostgreSQL transaction logs using the kNN data mining technique to detect atypical queries. This solution was based on the observation that the transaction record of an injection attack has a considerably different duration time than a typical transaction and generally other types of SQL instructions. The authors also developed a plain-text analysis function to identify each type of SQL injection attack. The results showed that the algorithm correctly identifies most tested SQL injections.

2. BACKGROUND

a. SQL Code Injection

SQL code Injection attack is defined as an attack that is carried out on a web application. The attacker enters SQL code in an input box (web form) to obtain illegal access to the application (Kumar y Pateriya, 2012).

b. Types of SQL Code Injection

- **Tautologies:** In this type of SQL injection, the attacker can inject malicious code into the query based on the conditional "or 1 = 1" that will always be evaluated as true (Al-Sayid y Aldlaeen, 2013).
- **Logically Incorrect Queries:** The attacker takes advantage of the invalid queries that were run with an error message to obtain information about the tables or data types (Varshney y Ujjwal, 2019).
- **Inference Boolean injection:** The attacker draws his logical conclusions from a true-false question thrown into the database (Varshney y Ujjwal, 2019).
- **Inference Time-based:** It is an inferential SQL injection technique that is based on sending an SQL query to the database, forcing the database to wait a specific amount of time (in seconds) before responding (Varshney y Ujjwal, 2019).
- **Union Query:** The attacker adds malicious code to a second secure query using the "union" operator to obtain information from the table of interest in the database (Varshney y Ujjwal, 2019).
- **Piggy-Backed Queries:** In this type of SQL injection, the attacker manipulates the data using the clauses: INSERT, UPDATE and DELETE without altering the logic of the original query (Al-Sayid y Aldlaeen, 2013).
- **Stored Procedure:** The attacker integrates malicious SQL injection codes into existing stored procedures in databases (Varshney y Ujjwal, 2019).
- **Alternate Encodings:** The attacker uses different encodings such as hexadecimal, ASCII, or Unicode to confuse the SQL statements avoiding basic validation (Al-Sayid y Aldlaeen, 2013).

c. Types of anomaly detection techniques

Table 1 compares the different data mining techniques to detect anomalies, their advantages, disadvantages, and the type of algorithm each technique follows.

Table 1. Comparison of the algorithms to identify anomalies

Name	Algorithm Type	Supervised Yes/No	Advantages	Disadvantages
kNN	Classification algorithm	Yes	Simple algorithm to train. Make assumptions about the distribution that the data follows are unnecessary.	Slow if you are working with a large amount of data.
Isolation Forest	Based on proximity	No	Efficient algorithm for outlier detection, especially in high-dimensional datasets.	Some of these model complexity increases with the data dimension and size. The training data is not labeled; the model must learn without a teacher.
CBLOF	Based on proximity	No	It has optimal performance with a small size of dimensions. Fast execution with large data sets,	It is not capable of capturing anomalies for a high-dimensional data set.
HBOS	Based on proximity	No	It performs well on global anomaly detection problems.	It cannot detect local outliers.
Feature Bagging	Outlier set	No	When training a data set, you take a sample of random characteristics rather than the entirety.	It should be combined with other methods to improve the predictive accuracy of outliers.

3. METHODOLOGY

In this study, the CRISP-DM methodology was adapted and applied to identify, select, process, and analyze the development of our artifact, which is the tool for intrusion detection. The steps that were carried out are the following:

- a. Problem Understanding: It is crucial to understand the objectives and requirements of the study.
- b. Data Understanding: Collecting quality data that brings us closer to the problem. Data is then scanned and verified, and unnecessary data is discarded.
- c. Data preparation: Data is prepared, cleaned, and integrated into an appropriate format for the data mining technique used later.
- d. Modeling: This phase focuses on selecting the appropriate modeling technique for the data mining project that is being developed.
- e. Model Evaluation: Evaluate that the steps of the model are carried out correctly and measure that each result obtained is following the objectives.
- f. Visualization: The final phase allows observing the system prototype data mining model.

3.1. Problem Understanding

This study aims to develop a system prototype that allows the identification and prediction of events of SQL injection attacks on PostgreSQL database servers.

An extensive bibliographic search was carried out in files, documents, books, among other references.

We needed reliable and accurate information, we consulted scientific studies from virtual academic libraries such as Research Gate, Google Scholar, among others, to know the advances in this field. Also, in this step, the programming language we will use is analyzed. Finally, it is verified that it has the necessary libraries to process large amounts of data to solve the problem.

The literature reviewed suggested that the authors should focus on increasing its accuracy and efficiency at the network or operating system level (Hu y Panda, 2004). Other documents of interest described approaches of different authors that brought us closer to understanding the problem. Lee et al. (2000) proposed a database intrusion detection method that looked at frequent temporary data access.

Muslihi y Alghazzawi (2020) proposed a probabilistic SQL injection detection technique through deep learning techniques. Brahma y Panigrahi (2020) used fuzzy logic in the intrusion detection behavior model in the database to identify intrusion on PostgreSQL databases. All of the above research is based on statistical methods. But data mining techniques are showing their potential in database-based intrusion detection.

3.2. Data Understanding

The data of interest in this project are plain text files containing sets of transaction logs generated daily by the CSIRT (Computer Security Incident Response Center) PostgreSQL server. The log transactions generated in PostgreSQL are written daily in a formatted file (.log) to be transformed into new files (.csv). For this, a VMWare Workstation 16.1 virtual machine with Windows 10 Operating System was used, and PostgreSQL version 9.5 was installed, which is the database management system of interest in this project. The first test data we worked on was 62 Megabytes of the transaction log.

The list below describes each unique value in the PostgreSQL configuration file for transactions log that simulates normal behavior.

- **% d:** Name of the database that is being used to run the queries.
- **% u:** Name of the user who connected to PostgreSQL server.
- **% r:** Host and remote port. The client making the connection must be on the same machine as the PostgreSQL server.
- **% p:** ID of the process. Unique identifier assigned to each transactions log.
- **% m:** Timestamp. It is the timestamp that includes milliseconds.
- **% s:** Is the transactions log on timestamp.
- **% i:** The command label returns the statement, such as: SELECT, INSERT, UPDATE, DELETE.

3.3. Data preparation

In this stage, the input data is processed so that it can be used in the chosen data mining technique, in this case kNN.

The steps we follow for data processing are detailed below:

3.3.1. Data Collection

Table 2 lists all the data selected and created from reading the log transaction set. The transaction log is collected in a text file format(.log) that is initially unstructured, so we read the file line by line to extract the data from each log using the libraries: pandas, CSV and Python as a programming language.

The files generated from this reading process are a document (.csv) with the attributes described in Table 2 and a separate text document where the LOG_ID and the RESULT of each set of log transactions are stored for later analysis of the type of attack in the evaluation stage.

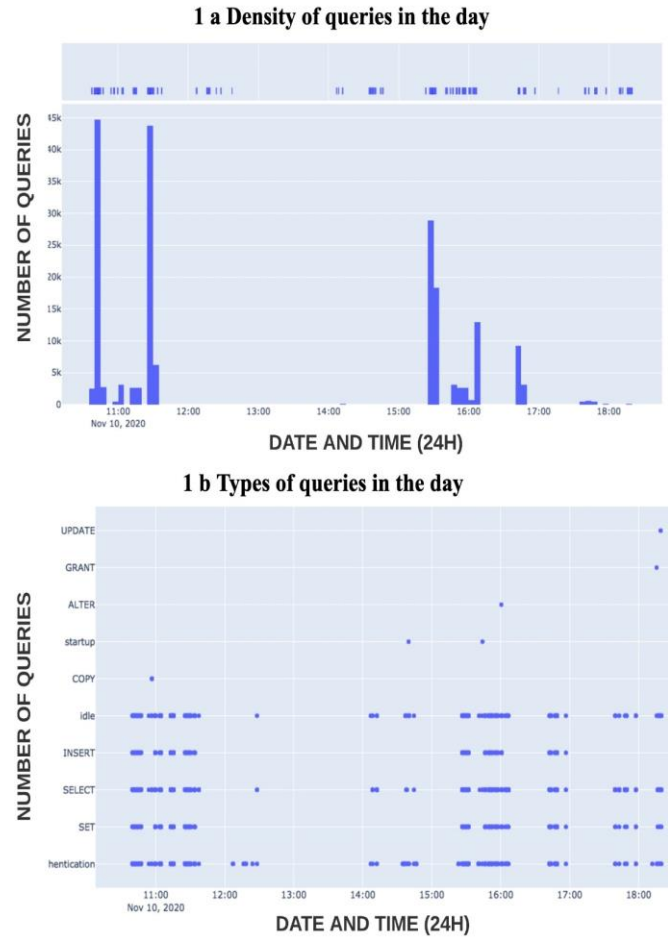
This step is crucial because it is unnecessary to use the sort technique to have a long string of text, such as the query statement for each transaction record. With the new CSV file, the PyOD tool allows us to preview the transaction log in the Cartesian plane according to the chosen variables without needing to make prior changes to the normalization of the values to observe them graphically. This phase helps to understand the behavior of the transaction log to have a clear view of the best variables that can be used to identify anomalies.

Table 2. Description of each attribute of log

Attribute Name	Description	Domain	Type
LOG_ID	Unique identifier generated for each transactions log	discrete	integer
BDD	Name of the database on which the transactions log was generated	categorical	string
USER	Name of the user who connected to PostgreSQL	categorical	string
IP	IP address of each computer	integer	integer
DATE	Date of the day the query was made to obtain the transactions log.	continuous	date
HOUR	Time of the query with milliseconds	continuous	time
DATE AND HOUR	Date and time of the day on which the query was made to obtain the log.	continuous	date
COMMAND	Type of sentence executed registered in the log.	categorical	string
DURATION	Duration time in seconds that the query takes to execute.	continuous	double
RESULT	Query execution result	categorical	string

Figure 1a shows the number of log transactions generated inside the database per hour. Based on this graphic representation, we can see that there are certain hours of the day when the queries made to the server are less active. Figure 1b shows a different plane in which the type of query performed by the log transactions in the database is displayed. It can be seen in detail that throughout the day, the most unusual commands are UPDATE, GRANT, ALTER, COPY.

In Figure 2, generated by the pyplot library, we can see a high density of transactions log generated in each query to the database for each hour of the day. It is necessary to know the dimension of the data to be processed and how to use it efficiently (Brahma y Panigrahi, 2020), that is why we present the density of queries done within the hours as shown in Figures 2a, 2b and 2c. These graphs helped to understand what type of values are most important in the generated log transactions and use them in the mining model, which will appropriately identify a behavior different from the normal one (Charania y Vyas, 2016).

**Figure 1.** Number of consultations per hour (1a) bar graph and (1b) types graph

3.3.2. Data Cleaning and Normalization

Certain log transactions collected with null values on the query date and time were eliminated so as not to interfere with the identification of anomalies.

Once the unnecessary columns and null values in the log transactions have been eliminated, taking into account the data analysis carried out with the PyOD tool using the kNN technique, we decide to generate separate files of 5 000 log transactions in each file. With each file generated in the previous steps, we normalize them. This means reshaping their data space so that their distribution along the Cartesian plane dimensions is approximately the same.

The traditional normalization method used for kNN is minimum-maximum normalization. Minimum-maximum normalization subtracts the minimum value of an attribute from each attribute value and divides the difference by the attribute range. These new values are multiplied by the new range of the attribute to get the time of execution and the time of the day and finally added to the new minimum value (Cho, 2002). These operations transform the data into a new range [0,1]. As can be seen in the formula;

$$X_{new} = \frac{X - \text{Min}(x)}{\text{Max}(X) - \text{Min}(X)} \quad (1)$$

Where:

X_{new} : Normalized Value

$Min(x)$: Minimum value of the characteristic

$Max(x)$: Maximum value of the characteristic

3.4. Modeling

Data analysis is the third stage, where the model is applied to detect SQL injection attacks. The steps followed are these:

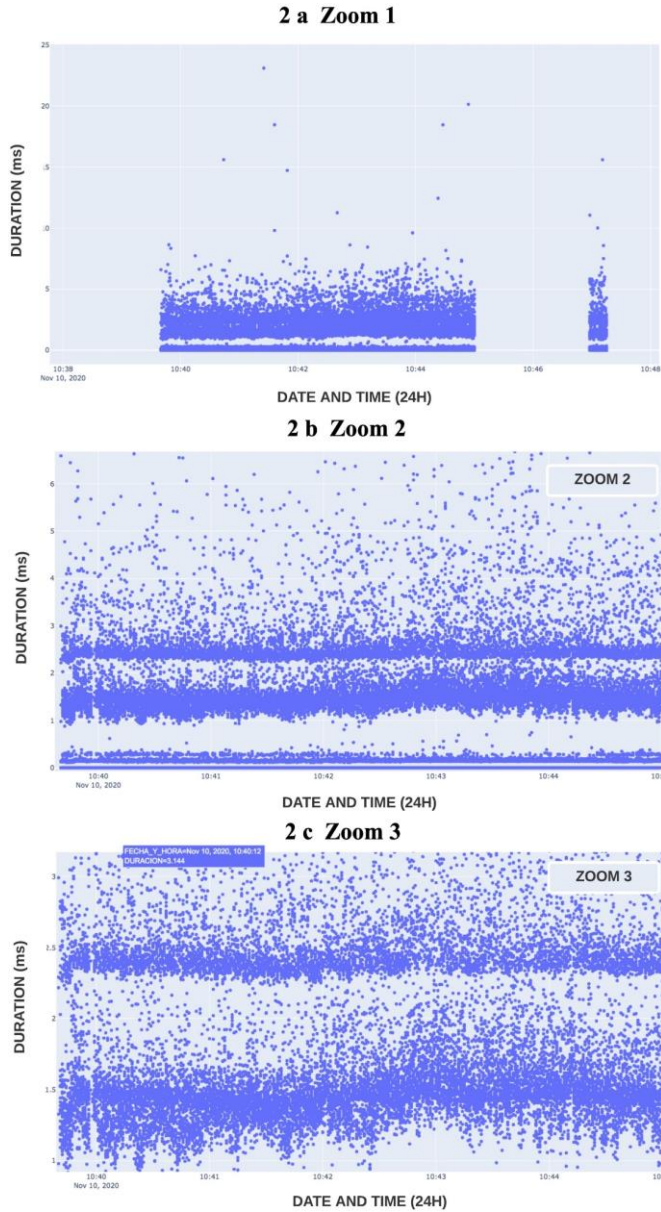


Figure 2. Log transactions duration and query time in the day (2a) Zoom1, (2b) Zoom 2 and (2c) Zoom 3

3.4.1 Anomalies Identification on Prepared Data

To identify anomalies (outliers) within a data set we use the PyOD library. This process is performed after the log transaction set has passed the data transformation and cleansing process. For this identification, a comparative evaluation between several algorithms was first carried out to understand how kNN works and why this algorithm was the best option in

this project. This comparison is listed in Table 1 and supported in the introduction. kNN was used within a plane comparing the query duration milliseconds and the query time in day. The duration of the executed query is the most critical factor in identifying database server injection attacks (Gong et al., 2019).

kNN Algorithm

The kNN classifier is based on a distance function that measures the difference or similarity between two instances (Wang et al., 2020). The standard Euclidean distance " $d(x, y)$ " between two instances " x " and " y " is defined by the formula:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

Where:

x : i -th highlight of the instance

y : i -th highlight of the instance and is the total number of features in the data set

It must be considered that the kNN algorithm is a non-parametric prediction method. This means that it does not require the elaboration of a previous model. To make a prediction, the kNN algorithm does not compute a predictive model from a training data set as in linear or logistic regression. Therefore, for kNN, there is no actual learning phase. This is why it is generally classified as a lazy learning method (Wang et al., 2020).

Figure 3 shows the implementation of the kNN (k-Nearest Neighbor) algorithm used for the atypical queries identification.

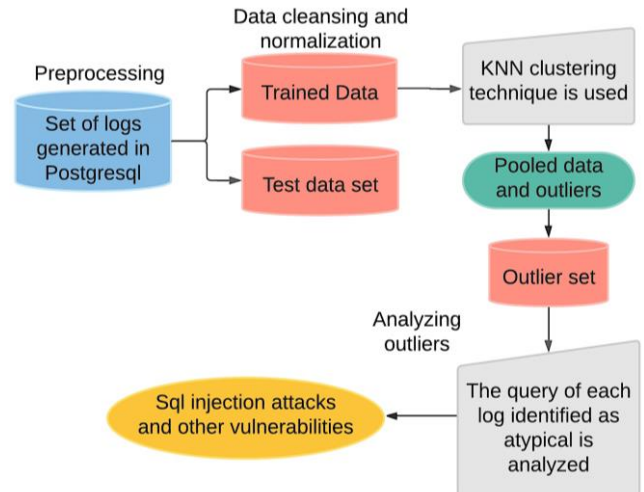


Figure 3. kNN Model for detection of atypical queries

The result of the aggrupation and anomalies identification is shown in Figure 4. The figure shows X and Y-axis normalized values. The black dots represent the anomalies detected by kNN, and the dots inside the red line, or colored white, represent the regular transactions log.

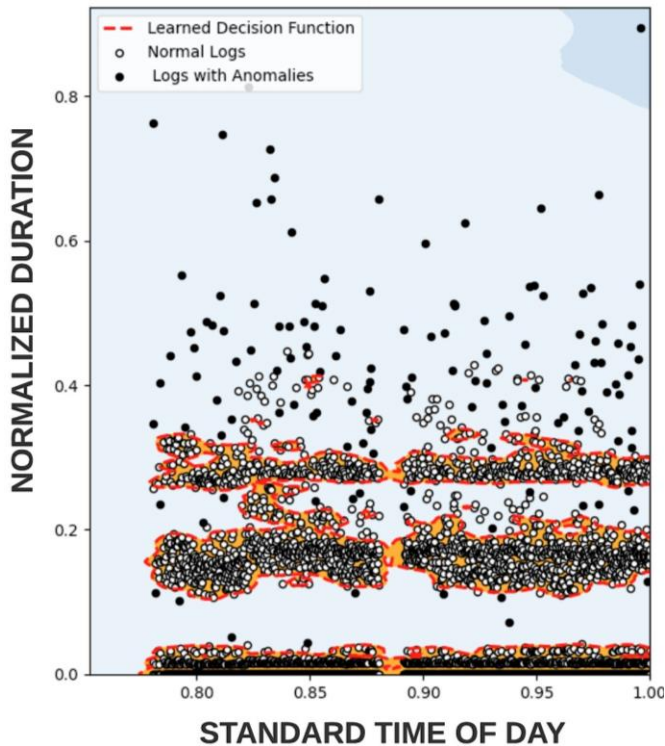


Figure 4. Anomalies Identified with kNN algorithm

3.4.2. Queries Text Analysis

The transactions log identified by the implemented algorithm as anomalies are stored in a new file. In this file, we found which anomalies are eventually a malicious attack, using text analysis on each query string to identify statements that are different from regular queries.

The following list shows the expressions used on the URL of the database server to simulate SQL injection attacks. Each query was tested with the model to identify the expressions on the SQL query.

- Tautology:
`http://localhost:3434/users.php?name=gabriela and 1=1--+`
- Logically Incorrect Queries:
`http://localhost:3434/users.php?name=gabriela and select * from gestion.ges_catalogo where cat_nombre = 'belleza'latina'`
- Union Query:
`http://localhost:3434/users.php?name=gabriela and union select prov_ruc, prov_razon_social, 22 from activo.proveedor where '1'='1' --+`
- Piggy-Backed Queries:
`http://localhost:3434/bodegas.php?name=BODEGA1; drop table gestion.ges_usuario --+`
- Inference Boolean injection:
`http://localhost:3434/bodegas.php?name=bodega1 and declare @s varchar (8000); select @s = prueba (); if (ascii (substring (@s, 1, 1)) & (power (2, 0))) > 0 waitfor delay '0:0:5'`
- Inference Time-based:
`http://localhost:3434/users.php?name=gabriela pg_sleep(15) --+`
- Stored Procedure:

`http://localhost:3434/users.php?name=gabriela and select *from gestion.ges_usuario where usr_nombre = " and usr_password = "; drop table gestion.ges_usuario --+`

- Alternate Encodings:

`http://localhost:3434/users.php?name=legalUser? exec(CHAR(0x73687574646f776e)) -- AND usr_password=" --+`

These listed SQL injection attacks have unique text expressions, and in this way, the authors were able to identify what type of SQL injection it is.

3.5. Model Evaluation

After establishing a classification model with defined test data, the next step is to determine how effective the implemented algorithm is in correctly identifying the transactions log that leaves traces of an SQL injection. For this, 50 SQL injection attacks were simulated on our PostgreSQL-based server. The result was obtaining 100 log transactions, 50 having SQL injections registered in the queries of each log transaction, and 50 log transactions with 'normal' behavior without any hint of attack. The results were as listed below in Table 3:

Table 3. Classification model performance results

Model Results	Prediction		Attack Transactions Log	Normal Transactions Log
	TP	FP		
Positive	84%	10%		
Negative	16%	90%		

$$Accuracy: \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} * 100\% = 87\% \quad (3)$$

$$Precision: \frac{TP}{TP + FP} * 100\% = 89.36\% \quad (4)$$

$$Sensibility: \frac{TP}{TP + FN} * 100\% = 84\% \quad (5)$$

Where:

TP: True Positive

TN: True Negative

FN: False Negative

FP: False Positive

The evaluation values reflected that:

- Out of 50 known attacks in the log transaction set, 42 were identified by our model. While eight were discarded as normal behavior. Although the model has desirable accuracy, it could leave multiple attacks unidentified in a large data set.
- Percentage results for accuracy, precision, and sensitivity are nearly even. So, we can reiterate that the implemented model works.

3.5.1. Text query analysis evaluation

This section presents the results of the SQL code injection attack tests of the developed model. In Figure 5, we can see a summary of the number of attacks carried out by each type of injection and the number identified by the system prototype. The graph shows that in various injection types, the model performance is effective for this project.

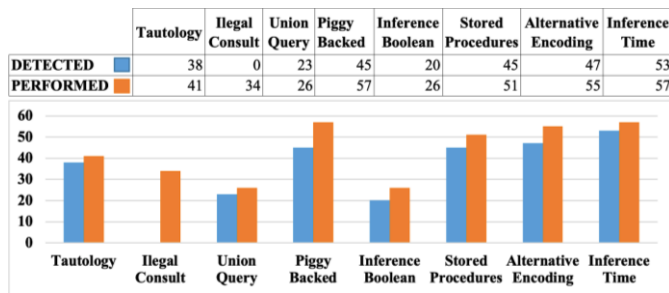


Figure 5. Comparison between attacks made and detected

We can see that the percentage of identification of each type of injection exceeds 76% of cases except for the type of injection of "Illegal Queries", the main reason is that the attacks are based on the error response, and there is no specific SQL command that can be detected (Chaki y Mat, 2019).

These percentages agree with the results of the performance calculation obtained from the implementation of the kNN based classification algorithm shown on the model evaluation. Although the obtained training set can achieve a good balance in size and precision, there is still some noise data, which will affect anomaly detection accuracy to a certain degree. If the precision of the automatically selected training set can be improved, the accuracy of the anomaly detection model will be further improved.

3.5.2. Load testing

The following four steps were the evaluated stages of the CRISP-DM implementation with the log files.

1. Data Collection

This step collects the data from the entered file, transactions log reading, attributes extraction, and generation of new files. These files will contain the data of the extracted transactions log in a format established for the next step.

2. Data Separation

This step performs a division log, where files are generated with a maximum of 5 000 transaction sets each.

3. Data transformation and Algorithm Implementation

Each of the transaction sets generated in the previous step is captured, cleaned, and normalized for implementing the kNN algorithm. This step results in the generation of new files with the transactions identified as anomalies.

4. Text Analysis

A text analysis of the query made to the database associated with the log transactions identified as an anomaly is performed. In case of registering any expression that reveals the existence of an attack or its attempt, the anomaly registry is sent to the system server.

This evaluation consists in measuring the execution time of each step explained by loading different sizes of log transaction files. The measurement of the execution time of the files was carried out by using the 'time' command, which shows the following results:

- **USER (U):** The amount of CPU time spent on user-mode code (outside the kernel) within the process. This is just the actual CPU time used to run the process.
- **CPU (C):** Percentage of CPU that was allocated to the command.
- **TOTAL:** Sum of the three attributes indicated at the end. The result is shown in seconds.

The behavior when executing each step with a different number of log transactions is shown in Table 4. The data collection and separation steps have an almost linear behavior for execution time, so it is inferred that the size of log transactions used on them does not affect their performance. Unlike the two last steps, execution times take much longer when the transactions log sets are larger.

The data transformation and kNN Implementation step seems to have more complexity and delay time, as shown in the first three log files. However, in the rest of files specified in Table 4 we can see that the text analysis step has an exponential delay growth when the set of log transactions is more extensive. Although there is an increase in the delay time of the third step, where a delay of 21 minutes was obtained with approximately half-million log transactions, this is understandable since the identification algorithm is implemented there. Unlike the text analysis, whose uncontrolled growth is due to the registry function that is sent to the server every time an anomaly is found. Also, we can see that the step that makes the most use of the central processing unit (CPU) is the third step, due to the separation of sets of logs and the identification of anomalies carried out in this step. The other steps have a uniform and normal CPU usage for the tasks they perform.

3.6. Visualization

Once the model evaluation phase was finished, a web interface was created to visualize the model results. Figure 6 shows the tools used and the design of the solution architecture we used to develop the system prototype.

3.6.1. Architecture

Our overall solution architecture has the main components:

a. Data Source

The PostgreSQL source database data where the transaction log files are created.

b. Data Processing

All changes made to the original files are made here.

c. Modeling

The anomalies detection and text analysis are executed here.

d. Data Storage

We make use of a free software provider for web hosting applications.

e. Visualization

Finally, data is presented in graphs for the final users.

Table 4. Classification model performance results

FILES	TIME (s)													
	2,6		5,2		10,4		20,7		41,7		83		166	
	10 000		20 000		40 000		80 000		160 000		320 000		640 000	
VARIABLES	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C
DATA COLLECTION	1	94%	1	82%	2	81%	4	76%	7	89%	16	84%	30	89%
Total	1,001		1,830		2,915		5,511		9,406		20,968		39,143	
DATA SEPARATION	1	75%	1	78%	2	65%	2	77%	2	73%	2	83%	3	64%
Total	2,352		2,326		3,097		2,650		3,247		3,581		7,058	
DATA TRANSFORMATION AND KNN IMPLEMENTATION	12	92%	23	96%	48	97%	87	97%	178	98%	365	98%	725	97%
Total	13,587		29,249		73,516		99,700		92,010		373,910		756,030	
TEXT ANALYSIS	4	33%	10	41%	36	50%	128	65%	465	77%	1784	85%	7164	91%
Total	12,460		23,433		59,900		199,430		507,220		2102,290		7870,950	
TOTAL (s)	29,400		56,838		139,428		307,291		611,883		2500,749		8673,181	

3.6.2. Interfaces

The following interfaces were created for the final visualization step:

a. Login

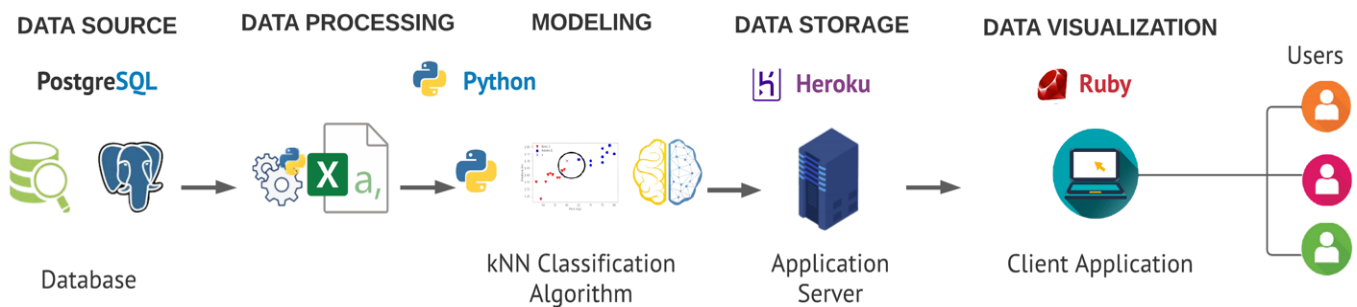
A login interface page was created for the web system. It contains the primary login fields and a button to retrieve the user's password if needed. The interface aimed to establish a layer of security for the users using the developed model.

b. Daily Summary Tab

This interface allows you to see daily summary graphs. The detected attacks graph displays the anomalies identified as attacks. These graphs show the attacks by hours and a division of the types of attacks.

c. Attack and Alert Log Tab

An interface was also created to show a table where the transactions log of all the attacks identified since the application start of operation are displayed. In the same way, it allows one to visualize in real time the attacks being detected and the associated data.

**Figure 6.** Solution Architecture

4. SOURCE CODE AVAILABILITY

Access to datasets and source code for reproduction are available from the corresponding author upon request.

5. DISCUSSION

Data preparation phase was executed with considerable work on data cleaning; we removed a significant amount of duplicate log transaction records because of empty columns,

special characters, useless data, among others. As a result, a new set of data ready to be processed was obtained.

The kNN model developed was the most appropriate approach for our planned solution. When evaluating this model, we obtained an accuracy of 89.36%, which is reflected in equation 4 and it is a good indicator that the model meets its objective of detecting SQL injections.

It is important to mention that most of the data mining algorithms are less efficient when their data set increases, and

so was the case in this project, it is recommended to use Big Data tools for a future approach on this scope.

6. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this study, we use the kNN classification algorithm because it is a simple algorithm that classifies the new data based on a measure of similarity. Additionally, it does not make assumptions about the distribution followed by the data and tells us that the closer a piece of data is to the data set has a normal behavior, the further away it is considered an anomaly.

The functionality tests in the evaluation stage reflected that the algorithm implemented in the system is practical and has the option to be implemented not only in PostgreSQL databases but also in others that can generate similar data used in this project.

From the project carried out, it is proposed to analyze the integration of the algorithm implemented for the identification of anomalies with a neural network since it has been shown in several current studies that a more robust and accurate intruder identifier can be obtained through the use of a constant learning network.

The kNN (k-Nearest Neighbor) algorithm correctly performed its objective and was detected SQL injection attacks when working with sets of 5 000 log transactions. Being a supervised learning algorithm, its implementation was straightforward, and its results were reflected by correctly classifying normal from abnormal behavior.

Big Data concepts can be added to improve the execution time of the application, one example is the use of parallelism with Hadoop Distributed File System (HDFS). This framework can reliably store process large amounts of data using simple programming models on a cluster. Furthermore, by distributing storage and computing across many servers, the resource can grow with demand while remaining inexpensive across all sizes (Shvachko et al., 2010).

It is recommended to investigate depth methods of identifying other types of attacks such as excess of privileges, denial of services (DoS), sensitive data without handling. There is a wide range of internal and external attacks, to which database servers can be vulnerable, different from those identified in this project.

REFERENCES

- Al-Sayid, N. A., & Aldlaeen, D. (2013, March). Database security threats: A survey study. In 2013 5th International Conference on Computer Science and Information Technology (pp. 60-64). IEEE. <https://pdf.zlibcdn.com/dtoken/a8e5836392db05a43b7d71fd52c2ffdd/CSIT.2013.6588759.pdf>
- Brahma, A., & Panigrahi, S. (2020). Role of soft outlier analysis in database intrusion detection. In *Advanced Computing and Intelligent Engineering* (pp. 479-489). Springer.
- Chaki, S. M. H., & Din, M. M. (2019). A Survey on SQL Injection Prevention Methods. *International Journal of Innovative Computing*, 9(1). <https://ijic.utm.my/index.php/ijic/article/view/224/143>
- Charania, S., & Vyas, V. (2016). SQL Injection Attack: Detection and Prevention. *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 2395-56. <https://docplayer.net/49705074-Sql-injection-attack-detection-and-prevention.html>
- Chetan, R., & Ashoka, D. V. (2012, January). Data mining based network intrusion detection system: A database centric approach. In 2012 International Conference on Computer Communication and Informatics (pp. 1-6). IEEE. <https://pdf.zlibcdn.com/dtoken/97d1ad3853bc5d09653697d9eab6958f/iccci.2012.6158816.pdf>
- Cho, S. B. (2002). Incorporating soft computing techniques into a probabilistic intrusion detection system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 32(2), 154-160.
- Gong, X., Zhou, Y., Bi, Y., He, M., Sheng, S., Qiu, H., ... & Lu, J. (2019, June). Estimating web attack detection via model uncertainty from inaccurate annotation. In 2019 6th IEEE International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud)/2019 5th IEEE International Conference on Edge Computing and Scalable Cloud (EdgeCom) (pp. 53-58). IEEE. <https://pdf.zlibcdn.com/dtoken/a8e4f9aa33faa580677d87cbb2fe7c2f/CSCloud/EdgeCom.2019.00019.pdf>
- Hu, Y., & Panda, B. (2004, March). A data mining approach for database intrusion detection. In *Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing* (pp. 711-716).
- Kumar, P., & Pateriya, R. K. (2012, July). A survey on SQL injection attacks, detection and prevention techniques. In 2012 Third International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT'12) (pp. 1-5). IEEE.
- Lee, V. C., Stankovic, J. A., & Son, S. H. (2000, May). Intrusion detection in real-time database systems via time signatures. In *Proceedings Sixth IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium. RTAS 2000* (pp. 124-133). IEEE.
- Malik, M., & Patel, T. (2016). Database securityattacks and control methods. *International Journal of Information*, 6(1/2), 175-183. <https://www.airconline.com/ijist/V6N2/6216ijist18.pdf>
- Muslihi, M. T., & Alghazzawi, D. (2020, October). Detecting SQL Injection On Web Application Using Deep Learning Techniques: A Systematic Literature Review. In 2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE) (pp. 1-6). IEEE.
- Shvachko, K., Kuang, H., Radia, S. y Chansler, R. (2010, mayo). El sistema de archivos distribuido Hadoop. En 2010, vigésimo sexto simposio de IEEE sobre sistemas y tecnologías de almacenamiento masivo (MSST) (pp. 1-10). IEEE.
- Teléfonica Company. (2015). Bases de datos y sus vulnerabilidades más comunes. <https://www.acens.com/wp-content/images/2015/03/vulnerabilidades-bbdd-wp-acens.pdf>
- Varshney, K., & Ujjwal, R. L. (2019). LsSQLIDP: Literature survey on SQL injection detection and prevention techniques. *Journal of Statistics and Management Systems*, 22(2), 257-269
- Wang, B., Ying, S., & Yang, Z. (2020). A Log-Based Anomaly Detection Method with Efficient Neighbor Searching and Automatic K Neighbor Selection. *Scientific Programming*, 2020. <https://www.hindawi.com/journals/sp/2020/4365356>

BIOGRAPHY



Cesar, Añasco was born in Quito - Ecuador in 1995. Graduated of the Computer and Computer Systems Engineering career (2021) at the National Polytechnic School. With professional experience in the area of Information Security. Research interests: Data Analysis and Web Development.



Karen, Morocho was born in Quito - Ecuador on January 31, 1996. Graduate of the Systems Engineering career at the National Polytechnic School. She has professional experience in the area of ICTs and technological solutions. Research interests: Web development, Databases, Big Data.



PhD. María Hallo is a professor at the Faculty of Systems Engineering of the National Polytechnic School, Quito-Ecuador. MSc in Computer Science Notre Dame de la Paix University, Namur, Belgium. PhD in Computer Science applications, University of Alicante. Research interests: Databases, Business Intelligence, Semantic Web, Digital Libraries.

Study of Polylactic Acid – Achira Starch Blends Compatibilized by Polyvinyl Alcohol

Molina, Pamela¹ ; Silva, Gabriela¹ ; Valle, Vladimir^{1*} ; Aldás, María-Belén² ; Proaño Erick² 

¹Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ciencia de los Alimentos y Biotecnología, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

Abstract: Polylactic acid (PLA) – achira starch blends were prepared using polyvinyl alcohol (PVA) and glycerol as compatibilizer and plasticizer, respectively. Blends were characterized through Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), and mechanical behavior. Fracture surfaces obtained from tensile test were evaluated by scanning electron microscopy (SEM). In addition, biodegradability of blends was determined in natural soil, vermicomposting method, aerobic and anaerobic conditions. According to results, PVA increased tensile strength, elongation at break and decreased Young's modulus. SEM images showed rugged surfaces with starch granules in the samples. Moreover, DSC results showed a single Tg value close to Tg of neat components whereas, FTIR spectra suggested the presence of hydrogen bonds between PLA and starch. Finally, vermicomposting results revealed a high degradation level of PLA – achira starch blends.

Keywords: polylactic acid, native starch, polyvinyl alcohol, biodegradability, compatibilizer

Estudio de Mezclas Ácido Poliláctico – Almidón de Achira Compatibilizadas con Polivinil Alcohol

Resumen: Se prepararon mezclas ácido poliláctico (PLA) – almidón de achira empleando polivinil alcohol (PVA) y glicerol como compatibilizante y plastificante, respectivamente. Las mezclas fueron caracterizadas en términos de espectroscopia infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR), calorimetría diferencial de barrido (DSC), y propiedades mecánicas. Las superficies de fractura obtenidas del ensayo de tensión fueron evaluadas por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM). Adicionalmente, se determinó la biodegradabilidad de las mezclas por medio de ensayos en suelo natural, vermicomposteo, así como también en condiciones aerobias y anaerobias. De acuerdo con los resultados, el PVA incrementó la resistencia a la tensión, elongación a la rotura y produjo una disminución en el módulo de Young. Las imágenes SEM exhibieron superficies rugosas con gránulos de almidón. Adicionalmente, los resultados de DSC evidenciaron un solo valor de Tg, muy cercana a la Tg de los componentes solos; en tanto que los espectros FTIR sugirieron la presencia de enlace hidrógeno entre PLA y almidón. Finalmente, los resultados de vermicomposteo revelaron un alto nivel de degradación de las mezclas PLA – almidón de achira.

Palabras clave: Ácido poliláctico, almidón nativo, polivinil alcohol, biodegradabilidad, compatibilizante

1. INTRODUCTION

Plastic pollution has drawn considerable environmental problems during the last centuries. It is estimated that over 50 million tons of plastic waste are globally produced each year (Thilagavathi et al., 2018). The low degradation and biodegradation rates of these discarded plastics hinder solid waste management and increase plastic debris in landfills, incineration as well as the propensity for dispersion in the environment (Ahmed et al., 2018; Gu, 2017). Therefore, plastic pollution affects not only terrestrial and aquatic ecosystems but also causes negative consequences on flora and fauna (UNEP, 2018; Webb et al., 2013).

Over the past decades, there has been a keen interest to find eco-friendly materials namely, bio-based and biodegradable polymers to replace traditional plastic (Avérous & Pollet, 2012; Sabbah & Porta, 2017). In the vast group of innovative alternatives obtained from renewable resources, polyhydroxyalkanoates (PHAs) and polylactic acid (PLA) are recognized by their important potential for industrial production (Niaounakis, 2014).

PLA, a chemically synthesized biopolyester, is commercially used in several applications due to its good processability, transparency and feasibility to be degraded in soil or compost in shorter time than conventional plastics (Pantani &

*vladimir.valle@epn.edu.ec

Recibido: 1/10/2022

Aceptado: 14/11/2022

Publicado en línea: 01/05/2023

10.33333/tp.vol51n2.03

CC BY 4.0

Sorrentino, 2013). However, some drawbacks like fragility, relative high water and gas permeability, and so forth limit its use in some applications (Xiao et al., 2012; Zeng et al., 2015). PLA can degrade and convert to water, carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and other small molecules under several conditions; but, the biodegradation rate of PLA is relatively slow compared with conventional polymers (Yang, et al., 2015). The biodegradation process of PLA could be affected by morphology, purity, chemical structure, shape, as well as its molecular weight and the presence of additives (Lv et al., 2017; Sharma et al., 2021). It has been reported that higher molecular weight PLA exhibited slower degradation kinetics as compared to the lower molecular weight one. In addition, the L enantiomer presence promotes biodegradation. High grade of crystallinity reduces the biodegradation rate. After biodegradation process, crystallinity of material increases and molecular weight decreases (Pujari, 2021; Brdlik et al., 2021).

On the other hand, starch is a widely available and inexpensive natural biopolymer. For further processing as a thermoplastic material, the addition of plasticizers such as glycerol (Altayan et al., 2017, 2021), sorbitol (Nevoralová et al., 2019; Smits et al., 2003) glycols (Correa et al., 2017; Nevoralová et al., 2019), maltodextrins (Xiaofei et al., 2004) or urea (de M. Teixeira et al., 2012; Kaseem et al., 2013) is required. Even though there is a great number of investigations focused on corn and wheat thermoplastic starches (Altayan et al., 2021), there is no comprehensive studies based on Andean region species, such as achira (*Canna edulis*), jícama (*Smallanthus sonchifolius*), mashua (*Tropaeolum tuberosum*), mauca (*Mirabilis expansa*) and oca (*Oxalis tuberosa*) (Espín et al., 2004).

Blending PLA with a natural biopolymer, e.g. starch, could not only accelerate the biodegradation rate of the final material but also increase the application range in products with short life cycles (Akrami et al., 2016). Nevertheless, these blends usually show poor mechanical properties due to the incompatibility produced by the hydrophobicity of PLA and hydrophilicity of starch (Xiao et al., 2012). Because of this fact, physic defects like holes and cavities are usually generated in the interface PLA-starch (Orozco et al., 2009).

To overcome incompatibility drawbacks, compatibilizers that improve miscibility, processing and flexibility are added into the blend (Shirai et al., 2016). Maleic anhydride, acrylic acid and diphenylmethane diisocyanate are some of most common compatibilizer agents tested (Xiong, Yang, et al., 2013). Nevertheless, the toxicity of these compounds limits their usefulness, since they are poisonous and consequently dangerous for health (Wang et al., 2008). In this context, polyvinyl alcohol (PVA) could increase the compatibility in PLA – starch blends (Lu et al., 2009) in view of emulsifying and adhesive properties, affordable cost and a low biodegradation rate (Wittaya, 2012). Therefore, the aim of this study is to look at the mechanical, thermal, infrared and biodegradability characteristics of PLA – achira starch blends compatibilized by PVA.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

PLA was obtained from NatureWorks Co. (USA). Density of PLA was 1.24 g/cm³. Food grade achira starch (23.8 % amylose) was purchased from Colinas Verdes Foundation (Ecuador). Glycerol laboratory grade was supplied by Toptrading Productos Químicos (Ecuador) and 88 % hydrolysed PVA was obtained from Sekisui Chemical Co., Ltd. (Japan).

2.2 Methods

2.2.1 Preparation of PLA-starch blends

Achira starch was sieved through a mesh No. 200 (HUMBOLDT, model H-3920) and dried at 40 °C for 2 h in oven (MM Group VENTICELL, model LSIS-B2V/VC 55). In addition, PLA and PVA were dried at 40 °C for 48 h. Conditioned raw materials (starch, PLA and PVA) and glycerol were manually pre-mixed at room conditions, and then fed into a mixer (HAAKE, model 557-9300) at 120 °C for 20 min with a rotation speed of 90 rpm. Afterward, films of 0.96 ± 0.03 mm thick were obtained using a heated lab press (CARVER, model 2112) at 120 °C and 17 MPa for 10 min. The component ratios were determined according to a previous work (Silva et al., 2018). The final composition of each formulation is presented in Table 1.

Table 1. Weight percentages of PLA – achira starch blends

Sample	PLA (%)	PVA (%)	Starch (%)	Glycerol (%)
M1	36.0	5.0	29.5	29.5
M2	36.0	7.0	28.5	28.5
M3	38.0	5.0	28.5	28.5
M4	38.0	7.0	27.5	27.5
M5	40.0	5.0	27.5	27.5
M6	40.0	7.0	26.5	26.5

2.2.2. Mechanical characterization

Tensile characteristics in terms of tensile strength, elongation at break and Young's modulus were assessed at room temperature (18 °C) on a universal testing machine (Instron, model 3365) according to the standard ASTM D882–18 with a crosshead speed of 12.5 mm/min. A total of five specimens was tested for each sample formulation.

After tensile test, the fractured surfaces of each specimen were analyzed through scanning electron microscope (TESCAN, model VEGA II LMU) with a voltage acceleration at 15 kV. All samples were kept under liquid nitrogen and the fractured surfaces were coated with gold particles before observation.

2.2.3. Thermal analysis

Differential scanning calorimetry (DSC) analysis was performed using a calorimeter (Netzsch, model 204 F1). Samples were heated from -20 to 350 °C with a heating rate of 20 °C/min in nitrogen atmosphere (20 mL/min). Netzsch Proteus software was used to determine glass transition temperature (T_g), onset temperature (T_m) and fusion enthalpy of endothermic processes (ΔH). Three samples were tested for each formulation.

2.2.4. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy

Attenuated total reflection Fourier transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy was used to obtain qualitative information about functional groups of PLA – achira starch blends. Tests were recorded on a spectrometer (Perkin Elmer, model Spectrum One). Data were collected over 16 scans with a resolution of 4 cm^{-1} in a range of 4000 to 650 cm^{-1} .

2.2.5. Biodegradability of blends

It was determined using natural soil, vermicomposting method, aerobic and anaerobic conditions according to the methodology reported in literature (Funabashi et al., 2007; Iwańczuk et al., 2015; Rudnik & Briassoulis, 2011; Ruiz et al., 2013). Films were cut into $30 \times 30\text{ mm}$ specimens for testing. The extent of biodegradation was estimated from the weight loss W_{loss} (%) of all samples based on equation (1):

$$\% W_{\text{loss}} = \frac{W_o - W_f}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

where W_o and W_f are the weights of specimen before and after to be buried in aerobic conditions, natural and vermicompost soil for 60 days. For anaerobic tests, the biodegradation was determined from the measurement of daily CH_4 production for 10 days. The samples were tested twice.

Natural soil tests: Experiments were carried out in a glass bin of $100 \times 30 \times 40\text{ cm}$ at 18°C . Specimens were buried in 2 cm deep in soil to simulate the environmental conditions. The moisture content and pH were around 8% and 7.5 , respectively.

Vermicomposting technique: Samples, soil and worms (*Eisenia foetida*) were placed in 0.5 L glass reactors (sample/worm ratio $4:1$). All test flasks were incubated (Mermet IF55 Plus series) at 60°C . The moisture content was about 25% at pH 7.5 .

Aerobic conditions: These experiments were conducted at 18°C in 2 L laboratory containers. Samples were buried under 5 cm of soil which was collected on top of a landfill of eight-month period of maturation in a weight ratio of $1:10$. The soil was manually stirred to maintain a constant mixture. The moisture content was 32% at pH 8 .

Anaerobic conditions: Tests were performed in 2 L bottles with hermetic seals placed in a carbon dioxide (CO_2) incubator (Blinder CB53-UL) at 60°C . Samples and soil weight ratio was $1:10$. The specimens were buried under 5 cm of soil that was obtained from one meter below a landfill surface of eight-month period of maturation. The produced biogas (CO_2 and CH_4) was passed through a 0.5 M sodium hydroxide solution to absorb CO_2 . The amount of CH_4 was obtained by the water displacement method. The moisture content and pH were adjusted to 35% and 8 , respectively.

3.1 Tensile evaluation

The tensile results and their analysis of variance (ANOVA) are presented in Figure 1 and Table 2, respectively. Since $p\text{-value} < 0.05$, there are statistical differences in tensile strength, elongation at break and Young's modulus. It is noticed that, the higher concentration of compatibilizer increased tensile strength, which was in good agreement with other studies (Ke & Sun, 2003; Lu et al., 2009). Due to the amphiphilic behavior of PVA, it could act as a "physical bridge" between starch and PLA (Koh et al., 2018). From this perspective, the interfacial affinity between PLA and starch would be improved. Moreover, a large amount of PVA slightly increased the elongation at break due to the enhancement of the interaction between PLA and starch. However, this effect is limited to low PVA content; higher percentages of PVA have not modified elongation of PLA-starch blends (Ke & Sun, 2003).

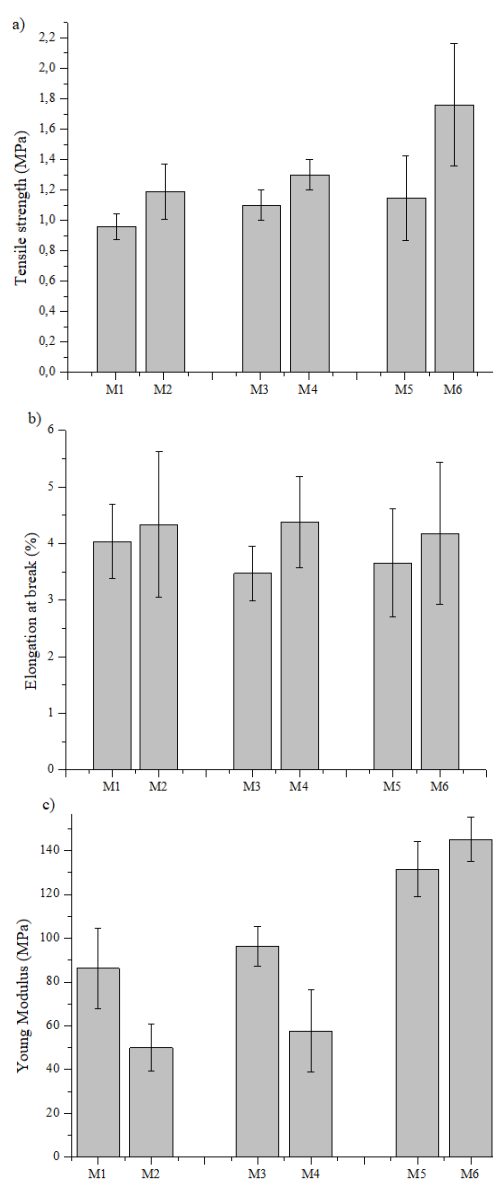


Figure 1. a) Tensile strength, b) elongation at break and c) Young's modulus

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 2. ANOVA for tensile behavior of PLA – achira starch blends ($\alpha = 0.05$)

Parameter	F	F critic	p-value
Tensile strength	7.382541	2.639999	0.000295
Elongation at break	3.355230	2.772853	0.025750
Young's modulus	49.211506	2.620654	7.74108E-12

Additionally, PVA and glycerol influenced Young's modulus due to flexibility and compatibility of those substances with starch. The reduction of elastic modulus when the compatibilizer increased was also found in other investigations (Akrami et al., 2016; Shirai et al., 2016). Park et al. (2000) reported that Young's modulus of PLA decreased at least 60 % when 10 % starch was incorporated. In the present research, as PVA and PLA content increased, starch and glycerol fraction decreased. Therefore, this reduction could also affect Young's modulus results.

On the other hand, the high tensile strength of PLA (110.32 MPa) changed the tensile strength of samples. This effect was attributed to the rule of mixtures which assures that blend properties are proportional to the component ratio (Akrami et al., 2016). Nevertheless, results evidenced a negative deviation behavior of rule of mixture. Similar observations were also reported by Esmaili et al. (2019), who associated this fact to plasticization of PLA with glycerol. This polyol caused an increment in the chain mobility and blends became more flexible and ductile (Lu et al., 2009). The variability in tensile strength and Young's modulus suggested internal defects in samples due to the presence of local stress concentrators (Alcalá et al., 2002). The inequitable distribution of tensions, i.e., applied load, caused complex deformation and rupture mechanisms (Arana & González, 2002).

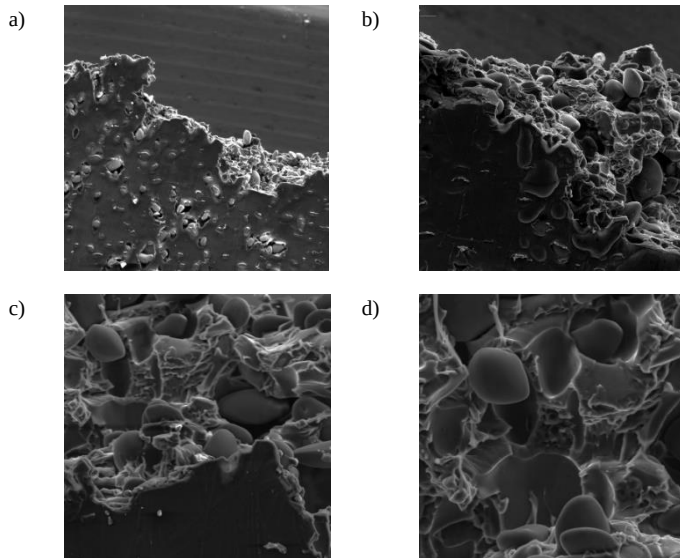
**Figure 2.** SEM images of M6 fracture surfaces sample a) 500X, b) 1000X and c) 1500X and d) 2000X

Figure 2 shows SEM images of the fracture surface of M6 sample. It is worth noting that, all samples presented similar fracture surface. From the images, rugged surfaces as well as the presence of starch granules are noticeable. The observed granules were associated to densely-packed semicrystalline structures with non-polar characteristics. These granules could

affect interaction PLA-starch (Orozco et al., 2009; Shirai et al., 2016; Soares et al., 2013; Ning et al., 2010).

3.2 Thermal analysis

DSC data and their ANOVA are shown in Table 3 and Table 4, respectively. It is observed statistical differences in thermal properties due to p -value < 0.05 . Particularly, each sample presented a single T_g between the T_g of pristine components, with 64.9 and 70.9 °C for PLA and PVA, respectively. These values are in agreement with those reported in literature (Aydin & Ilberg, 2016; Xiong et al., 2013). According to Rozsa et al. (2004), the presence of a single T_g value evidences an interaction between the components in the blend (Rozsa et al., 2004).

Even though there was a slight T_g variation in each sample, around 0.9 °C, these values increased proportionally to PLA and PVA contents. Colonna and Buleon (2010) report that T_g values increase directly with crystallinity amount present in the blend, due to restriction of polymer chains mobility (Colonna & Buleon, 2010). In this context, PLA and PVA contributed to the slight increase in T_g values. Besides this, as PLA and PVA contents increase in each sample, the proportion of glycerol decreases. Aydin and Ilberg (2016) consider that plasticizers, which are low molecular weight components, reduce T_g values (Aydin & Ilberg, 2016); consequently, the addition of glycerol in higher proportions in the samples produces T_g reduction in the blends. According to Chotiprayon et al. (2020), this behavior could be the result of the glycerol migration from the thermoplastic phase which allows mobility of PLA chains. Da Róz et al. (2006) reported that melting transition appears frequently as a large multiple band, which values are shown in Table 3.

Table 3. DSC results for the thermal transitions of PLA – achira starch blends and pristine materials.

Sample	T_g (°C)	T_m (°C)	ΔH (J/g)
M1	59.8 ± 0.2	143.3 ± 0.3	-212.7 ± 0.2
M2	60.5 ± 0.3	149.9 ± 0.4	-206.4 ± 0.5
M3	61.1 ± 0.1	144.7 ± 0.1	-200.8 ± 0.1
M4	61.5 ± 0.2	147.1 ± 0.3	-196.9 ± 0.1
M5	62.5 ± 0.3	149.0 ± 0.2	-195.6 ± 0.2
M6	64.3 ± 0.2	155.2 ± 0.4	-160.9 ± 0.3
PLA	64.9 ± 0.3	156.0 ± 0.7	-0.289 ± 0.004
PVA	70.9 ± 0.9	176.5 ± 0.5	-31.2 ± 0.8
Starch	-	-	-141.6 ± 0.7
Glycerol	-	-	-825.0 ± 0.9

Regarding thermal transition behavior, the results presented T_m closed to the PLA crystallinity melting point, around 150 °C (Martin & Avérous, 2001). The endothermic process continues with the PVA melting (Aydin & Ilberg, 2016) and mainly to the phase change of glycerol at 290 °C (Benjumea et al., 2009; Müller et al., 2016). Colonna and Buleon (2010) state that the addition of a plasticizer reduces the melting point due to it improves the mobility of the polymer chains (Colonna & Buleon, 2010); thus, it is evident that T_m decreased with

greater proportions of glycerol in the samples. Additionally, ΔH values were incremented moderately with increasing plasticizer content. This behavior was in concordance with the study proposed by Da Róz, et al. (2006).

Table 4. ANOVA for DSC of PLA – achira starch blends ($\alpha = 0.05$)

Parameter	F	F critic	p-value
Tg	6.163432	4.387374	0.023369
Tm	8.567104	5.005682	0.013462
ΔH	7.095284	5.899379	0.016201

3.3 FTIR evaluation

Figure 3a shows spectra of PLA, PVA, starch and glycerol. Characteristic absorption bands of PLA were associated to –CH stretching vibration (2956 cm^{-1}), stretching vibration of –C=O group (1757 cm^{-1}) and bands corresponding to –C–O stretching vibration of ester bonds ($1076\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$) (Orozco et al., 2009). The PVA spectrum shows –OH (3265 cm^{-1}), –CH (2934 cm^{-1}), –C=O (1732 cm^{-1}) and –C–O–C (1105 cm^{-1}) groups (Mansur et al., 2008). Furthermore, infrared results of starch evidenced characteristic bands of –OH (3433 cm^{-1}), stretching vibration of –CH ($2851\text{--}2920\text{ cm}^{-1}$), deformation of the OH groups from the bound water (1645 cm^{-1}) and C–O stretching ($997\text{--}1190\text{ cm}^{-1}$) (Andrade et al., 2012). Absorption bands of –OH stretching (3294 cm^{-1}), –CH stretching ($2880\text{--}2936\text{ cm}^{-1}$), –CH bending ($1480\text{--}1190\text{ cm}^{-1}$) and –C–O– stretching ($1110\text{--}990\text{ cm}^{-1}$) were observed in glycerol spectrum (Ahmed et al., 2010).

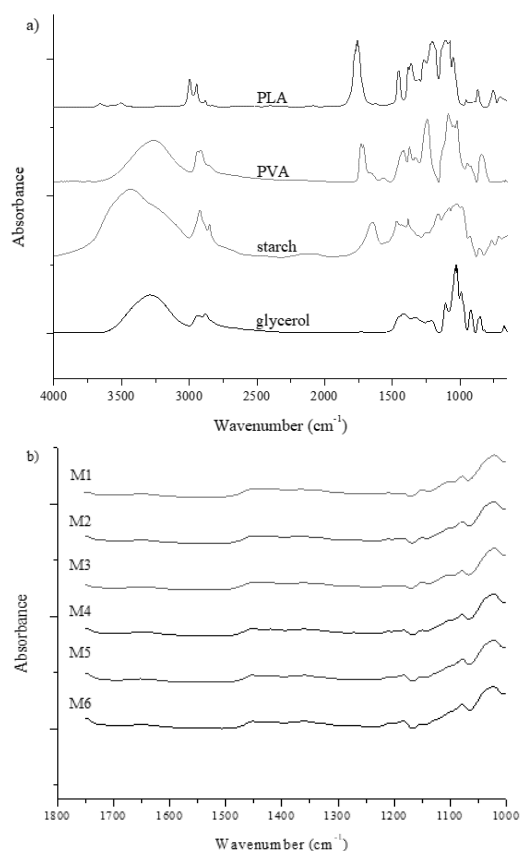


Figure 3. FTIR spectra of (a) PLA, PVA, achira starch, glycerol and (b) studied samples

As can be seen in Figure 3b, all PLA – starch blends spectra show similar absorption bands. However, the –C=O had shifted to a lower wavenumber (1747 cm^{-1}) compared to PLA and to a higher region contrasted to carbonyl group of PVA. Moreover, the –C–O stretching shifted to a low wavenumber (1022 cm^{-1}) compared with absorption bands of PLA.

In addition, the –OH in PVA is shifted to higher wavenumber in PLA – starch blends (3271 cm^{-1}) and the –OH bands width of starch and PVA are reduced. These changes are observed in Figure 3a. Furthermore, the –OH group in glycerol was moved to a lower wavenumber, which was probably produced by the weakening of intramolecular and intermolecular hydrogen bonds between starch molecules because the presence of glycerol and its plasticizing effect. These variations demonstrate the formation of new hydrogen bonds between starch and PVA (Chen et al., 2008; Popescu et al., 2018). On the whole, FTIR study suggested that the mentioned groups were involved in the interaction between components which was associated to a possible hydrogen bonding between the –C=O from PLA and the –OH of starch (Ke & Sun, 2003; Yew et al., 2005).

3.4 Biodegradability of blends

The results of degradation tests, in terms of mass loss percentage, are presented in Table 5. Overall, there was a notorious variation of biodegradability in aerobic and vermicomposting tests, whereas natural soil evaluation showed a minimum change in percentage of biodegradability. Considering this fact, M5 and M6 samples exhibited higher biodegradation values, aerobic and vermicomposting results showed an important influence of PLA content on the degradation level. Thus, there was not possibly significant incidence of PVA composition on blends biodegradation. In the case of natural soil, all the samples achieved similar results; however, the dispersion observed in this test did not enable a specific tendency to be determined. The minimum change indicated a relative low degradation rate of the studied blends in natural soil when compared with the other tests. Consequently, these results may be associated with the slow hydrolysis process at the test temperature and to the heterogeneous distribution of microorganisms in the natural soil environment (Karamanlioglu et al., 2017).

Table 5. Results of biodegradable analysis for 8 weeks in different conditions

Sample	Aerobic conditions (%)	Natural soil (%)	Vermicomposting (%)
M1	59.26 ± 1.66	54.91 ± 6.68	61.41 ± 1.07
M2	58.11 ± 1.73	55.23 ± 5.24	59.87 ± 1.49
M3	71.85 ± 1.41	52.68 ± 5.16	90.10 ± 1.92
M4	79.26 ± 1.54	52.21 ± 6.97	92.23 ± 1.59
M5	86.35 ± 1.22	51.94 ± 4.63	98.25 ± 0.59
M6	89.17 ± 1.44	52.09 ± 5.48	99.02 ± 0.41

Râpă et al. (2014) found that films with the highest percentage of starch had the highest values of weight loss. The mentioned results were established when the effect of starch content on the biodegradability starch/PVA blend films prepared using

the melting technique was determined in soil during a period of 30 days, which differs from the results obtained in the present study.

Some studies indicate that starch/PVA blends are not easily biodegraded in environmental conditions. However, a certain degree of biodegradation was achieved in one study when starch/PVA films cast by the solvent method were exposed to soil containing manure. An increase in the biodegradation rate was favored by the increase of starch content. Even though, ultimate weight loss did not exceed 40% over a period of 3 months and the authors affirm that this starch/PVA blend plastic film may not degrade easily in natural conditions (Raj, 2004), these values are lower than the ones reported in this study.

Lim et al. (2021) reported that in a soil buried test, the samples with the highest concentration of starch in starch/PVA blends showed the lower degradation, concluding that this behavior could be produced by the PVA solubility in water. When water was absorbed onto the hydrophilic groups through hydrogen bonding or weak electrostatic forces, the film could easily be dissipated (Lim et al., 2021). These results are in agreement with the vermicomposting and aerobic tests values of the present study for M6 sample, in which the PVA content is the highest. Even though the PVA proportion is the highest, it is quite low when compared to the PLA and starch proportion in blends M5 and M6. In this context, some authors indicate that the presence of starch is the main factor in the degradation of PLA/starch blends, since starch granules hydrolyze and affect the mechanical properties of PLA, being this effect being more evident when the starch content is higher (Lv et al., 2018; Wilfred et al., 2018).

Both aerobic and vermicomposting tests presented a level of degradation greater than 60%, which shows the ability of the material to biodegrade in short periods under the conditions of this investigation (Shi et al., 2011). These high values may be caused due to PLA and PVA's susceptibility to be hydrolyzed. Likewise, starch promoted not only microorganism growth but also the diffusion of water into the blend (Lv et al., 2017). Obtained results show a significant degradation under mesophilic conditions. Therefore, temperature probably had an important influence on PLA-starch blends.

As it is presented in Figure 4, the CH₄ volume generated from samples are similar. This degradation behavior suggests that there was no significant influence of formulation on generated CH₄ volume. During the first six days, systematic volume increase was found in all the studied materials.

It should be noted that CH₄ volume change did not show a latency phase, which could indicate a very short microorganism adaptation time to the substrate. After ten days of anaerobic evaluation, samples were not visible in the soil; this behavior was probably related to the temperature of the test which favored the hydrolysis reactions of the blend components; subsequently, accelerating enzymatic reactions produced by microorganisms (Djonlagic & Nikolic, 2011; Garlotta, 2001; Hakkarainen, 2002).

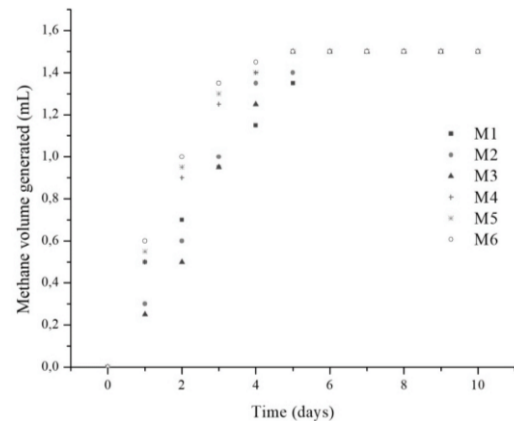


Figure 4. Volume changes of samples during anaerobic degradation testing

Russo et al. (2009) reported anaerobic degradation of thermoplastic starch (TPS) - PVA blended films in mesophilic conditions. The blends of TPS:PVA were varied at 90:10, 75:25, 50:50, and 0:100 (w/w %). The authors concluded that a higher quantity of starch in the blend resulted in increased biogas production, and starch degraded faster than PVA, in contrast with the results of this study.

Figure 5 shows an example of the appearance of samples before and after the tests. All samples exhibited signs of biodegradation. The original shape of the film was not preserved in all cases. In aerobic conditions (Figure 5a) and natural soil (Figure 5b) white pieces were found. These were larger in the former case and smaller in the latter. Furthermore, in the vermicomposting test, the films were converted into very small pieces, with soil adhered to them.

The compostability of PLA alone compared to starch/PLA blends with different amounts of starch has also been evaluated. After 30 days, all samples tested were completely biodegraded, and no residuals were observed through visual inspection (Rudeekit et al., 2012). In addition, biodegradability of pure starch, pure PVA and a 70 % starch /PVA composite films was studied by soil burial test at ambient conditions by Patil et al. (2021). It was observed that the complete degradation of pure starch films occurred in one week, while pure PVA and 70 % starch /PVA composite film took three weeks for complete degradation. These results show a faster degradation than the one observed in this study.

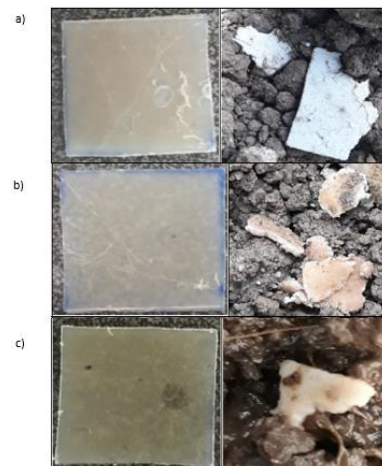


Figure 5. M6 samples biodegradation test a) Aerobic conditions b) Natural soil and c) Vermicomposting

3. CONCLUSIONS

PLA – achira starch blends were successfully obtained with PVA as a compatibilizer. The addition of compatibilizer agent increased both tensile strength and elongation at break, meanwhile Young's modulus decreased. SEM micrographs of fractured surface displayed eroded and rugged surfaces with starch granules as a consequence of the uncompleted interaction between PLA and starch. On the other hand, DSC thermograms showed a single Tg value close to Tg of neat components. In addition, it was observed slight increase of Tg with PLA and PVA contents. Besides, FTIR spectra of samples suggested the formation of new hydrogen bonds between PLA and starch components, due to the shift of carbonyl and hydroxyl bands. From the biodegradability perspective, the vermicomposting method showed a great degradation level of PLA – achira starch blends caused by the microbial activity in the proposed conditions.

REFERENCES

- Ahmed, K., McLeod, M., Nézar, J., & Giuliani, A. (2010). Fourier transform infrared and near-infrared spectroscopic methods for the detection of toxic Diethylene Glycol (DEG) contaminant in glycerin based cough syrup. *Spectroscopy*, 24(6), 601–608. <https://doi.org/10.3233/SPE-2010-0482>
- Ahmed, T., Shahid, M., Azeem, F., Rasul, I., Shah, A. A., Noman, M., Hameed, A., Manzoor, N., Manzoor, I., & Muhammad, S. (2018). Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(8), 7287–7298. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
- Akrami, M., Ghasemi, I., Azizi, H., Karrabi, M., & Seyedabadi, M. (2016). A new approach in compatibilization of the poly(lactic acid)/thermoplastic starch (PLA/TPS) blends. *Carbohydrate Polymers*, 144, 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.02.035>
- Alcalá, J., Llanes, L. M., Mateo, A. M., & Salán, M. N. (2002). *Fractura de materiales* (M. J. Anglada (ed.); First). Edicions UPC.
- Altayan, M. M., Al Darouich, T., & Karabet, F. (2017). On the Plasticization Process of Potato Starch: Preparation and Characterization. *Food Biophysics*, 12(4), 397–403. <https://doi.org/10.1007/s11483-017-9495-2>
- Altayan, M. M., Al Darouich, T., & Karabet, F. (2021). Thermoplastic starch from corn and wheat: a comparative study based on amylose content. *Polymer Bulletin*, 78(6), 3131–3147. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03262-9>
- Andrade, M., Tapia, D., & Menegalli, F. (2012). Physical-chemical, thermal, and functional properties of achira (*Canna indica* L.) flour and starch from different geographical origin. *Starch*, 64(5), 348–358. <https://doi.org/10.1002/star.201100149>
- Arana, J. L., & González, J. J. (2002). *Mecánica de Fractura* (First). Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- Avérous, L., & Pollet, E. (2012). Biodegradable Polymers. En L. Avérous & E. Pollet (Eds.), *Environmental Silicate Nano-Biocomposites* (First, pp. 13–39). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4108-2_2
- Aydin, A. A., & Ilberg, V. (2016). Effect of different polyol-based plasticizers on thermal properties of polyvinyl alcohol:starch blends. *Carbohydrate Polymers*, 136, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.093>
- Benjumea, P. N., Agudelo, J. R., & Rios, L. A. (2009). *Biodeisel: Producción, calidad y caracterización* (First). Editorial Universidad de Antioquia.
- Brdlík, P., Borůvka, M., Běhálek, L., & Lenfeld, P. (2021). Biodegradation of Poly (Lactic Acid) Biocomposites under Controlled Composting Conditions and Freshwater Biotope. *Polymers*, 13(4), 594.
- Chen, Y., Cao, X., Chang, P., & Huneault, M. (2008). Comparative study on the films of poly(vinyl alcohol)/pea starch nanocrystals and poly(vinyl alcohol)/native pea starch. *Carbohydrate Polymers*, 73(1), 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.10.015>
- Colonna, P., & Buleon, A. (2010). Thermal transitions of starches. En A. Bertolini (Ed.), *Starches. Characterization, Properties, and Applications* (First, pp. 71–102). CRC Press Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420080247-9>
- Correa, A. C., Carmona, V. B., Simão, J. A., Capparelli Mattoso, L. H., & Marconcini, J. M. (2017). Biodegradable blends of urea plasticized thermoplastic starch (UTPS) and poly(ε-caprolactone) (PCL): Morphological, rheological, thermal and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 167, 177–184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.051>
- Da Róz, A. L., Carvalho, A. J. F., Gandini, A., & Curvelo, A. A. S. (2006). The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing. *Carbohydrate Polymers*, 63(3), 417–424. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.09.017>
- de M. Teixeira, E., Curvelo, A. A. S., Corrêa, A. C., Marconcini, J. M., Glenn, G. M., & Mattoso, L. H. C. (2012). Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid). *Industrial Crops and Products*, 37(1), 61–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.1.1036>
- Djonlagic, J., & Nikolic, M. S. (2011). Biodegradable Polyesters: Synthesis and Physical Properties. En S. Sharma & A. Mudhoo (Eds.), *A Handbook of Applied Biopolymer Technology: Synthesis, Degradation and Applications* (First, pp. 149–196). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849733458-00149>
- Esmaeili, M., Pircheraghi, G., Bagheri, R., & Altstädt, V. (2019). Poly(lactic acid)/coplasticized thermoplastic starch blend: Effect of plasticizer migration on rheological and mechanical properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(4), 839–851. <https://doi.org/10.1002/pat.4517>
- Espín, S., Villacrés, E., & Brito, B. (2004). Caracterización Físico-Química, Nutricional y Funcional de Raíces y Tubérculos Andinos. En V. Barrera, C. Tapia, & A.

- Monteros (Eds.), *Raíces y Tubérculos Andinos: Alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador* (Fisrt, p. 30). INIAP/CIP/COSUDE. <http://181.112.143.123/bitstream/41000/2827/1/iniapsc322est.pdf>
- Funabashi, M., Ninomiya, F., & Kunioka, M. (2007). Biodegradation of polycaprolactone powders proposed as reference test materials for international standard of biodegradation evaluation method. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 7–17. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0041-4>
- Garlotta, D. (2001). A literature review of poly(lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*, 9(2), 63–84. <https://doi.org/10.1023/A:1020200822435>
- Gu, J.-D. (2017). Biodegradability of plastics: the pitfalls. *Applied Environmental Biotechnology*, 2(1), 59–61. <https://doi.org/10.26789/aeb.2017.01.008>
- Hakkarainen, M. (2002). Aliphatic polyesters: Abiotic and biotic degradation and degradation products. *Advances in Polymer Science*, 157, 113–138. https://doi.org/10.1007/3-540-45734-8_4
- Iwańczuk, A., Kozłowski, M., Łukaszewicz, M., & Jabłoński, S. (2015). Anaerobic Biodegradation of Polymer Composites Filled with Natural Fibers. *Journal of Polymers and the Environment*, 23(2), 277–282. <https://doi.org/10.1007/s10924-014-0690-7>
- Karamanlioglu, M., Preziosi, R., & Robson, G. D. (2017). Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly(lactic acid): A review. *Polymer Degradation and Stability*, 137(1), 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.009>
- Kaseem, M., Hamad, K., & Deri, F. (2013). Slit die rheology of thermoplastic starch during extrusion process. *International Journal of Plastics Technology*, 17(1), 51–60. <https://doi.org/10.1007/s12588-013-9044-x>
- Ke, T., & Sun, X. S. (2003). Starch, Poly(lactic acid), and Poly(vinyl alcohol) Blends. *Journal of Polymers and the Environment*, 11(1), 7–14. <https://doi.org/10.1023/A:1023875227450>
- Koh, J. J., Zhang, X., & He, C. (2018). Fully biodegradable Poly(lactic acid)/Starch blends: A review of toughening strategies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109(1), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.048>
- Lim, R., Kiew, P. L., Lam, M. K., Yeoh, W. M., & Ho, M. Y. (2021). Corn starch/PVA bioplastics—The properties and biodegradability study using *Chlorella vulgaris* cultivation. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 16(3). <https://doi.org/10.1002/apj.2622>
- Lu, D. R., Xiao, C. M., & Xu, S. J. (2009). Starch-based completely biodegradable polymer materials. *Express Polymer Letters*, 3(6), 366–375. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.46>
- Lv, S., Zhang, Y., Gu, J., & Tan, H. (2017). Biodegradation behavior and modelling of soil burial effect on degradation rate of PLA blended with starch and wood flour. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 159(1), 800–808. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.08.056>
- Lv, S., Zhang, Y., Gu, J., & Tan, H. (2018). Physicochemical evolutions of starch/poly (lactic acid) composite biodegraded in real soil. *Journal of Environmental Management*, 228, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.033>
- Mansur, H., Sadahira, C., Souza, A., & Mansur, A. (2008). FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde. *Materials Science and Engineering C*, 28(4), 539–548. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.10.088>
- Martin, O., & Avérous, L. (2001). Poly(lactic acid): Plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. *Polymer*, 42(14), 6209–6219. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00086-6)
- Müller, P., Bere, J., Fekete, E., Móczó, J., Nagy, B., Kállay, M., Gyarmati, B., & Pukánszky, B. (2016). Interactions, structure and properties in PLA/plasticized starch blends. *Polymer*, 103(26), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.09.031>
- Nevoralová, M., Koutný, M., Ujčić, A., Horák, P., Kredatusová, J., Šerá, J., Růžek, L., Růžková, M., Krejčíková, S., Šlouf, M., & Kruliš, Z. (2019). Controlled biodegradability of functionalized thermoplastic starch based materials. *Polymer Degradation and Stability*, 170, 108995. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.108995>
- Niaounakis, M. (2014). Biopolymers: Processing and Products. En *PDL Handbook Series* (First). William Andrew, Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-09982-3>
- Orozco, V. H., Brostow, W., Chonkaew, W., & López, B. L. (2009). Preparation and Characterization of Poly(Lactic Acid)-g-Maleic Anhydride + Starch Blends. *Macromolecular Symposia*, 277(1), 69–80. <https://doi.org/10.1002/masy.200950309>
- Pantani, R., & Sorrentino, A. (2013). Influence of crystallinity on the biodegradation rate of injection-moulded poly(lactic acid) samples in controlled composting conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 98(5), 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.01.005>
- Park, J. W., Im, S. S., Kim, S. H., & Kim, Y. H. (2000). Biodegradable polymer blends of poly(L-lactic acid) and gelatinized starch. *Polymer Engineering and Science*, 40(12), 2539–2550. <https://doi.org/10.1002/pen.11384>
- Patil, S., Bharimalla, A. K., Mahapatra, A., Dhakane-Lad, J., Arputharaj, A., Kumar, M., ... Kambli, N. (2021). Effect of polymer blending on mechanical and barrier properties of starch-polyvinyl alcohol based biodegradable composite films. *Food Bioscience*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101352>
- Plastic Films in Food Packaging: Materials, Technology and Applications. (2012). En S. Ebnesajjad (Ed.), *PDL Handbook Series* (First). William Andrew, Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00246-3>
- Popescu, M. C., Dogaru, B. I., Goanta, M., & Timpu, D. (2018). Structural and morphological evaluation of CNC reinforced PVA/Starch biodegradable films. *International Journal of Biological Macromolecules*,

- 116, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.036>
- Pujari, R. (2021). Ageing performance of biodegradable PLA for durable applications (Doctoral dissertation, Rochester Institute of Technology).
- Raj B, Somashekar R. (2004). Structure–property relation in polyvinyl alcohol/starch composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 91(1), 630–635.
- Răpă M, Grosu E, Stoica P, Andreica M, Hetvary M. (2014). Polyvinyl alcohol and starch blends: properties and biodegradation behavior, *Journal of Environmental Research and Protection*, 11 (1), 34–42.
- Rozsa, C., Dupeyrón, D., Galego, N., Cyras, V. P., & Vázquez, A. (2004). Miscibilidad de mezclas poliméricas de polihidroxialcanoatos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(2), 55–66.
- Rudeekit Y, Siriyota P, Intaraksa P, Chaiwutthinan P, Tajan M, Leejarkpai T. (2012). Compostability and Ecotoxicity of Poly (lactic acid) and Starch Blends, *Advanced Materials Research*, 506, 323–326.
- Rudnik, E., & Briassoulis, D. (2011). Comparative Biodegradation in Soil Behaviour of two Biodegradable Polymers Based on Renewable Resources. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(1), 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0243-7>
- Ruiz, M., Pastor, K., & Acevedo, A. (2013). Biodegradabilidad de Artículos Desechables en un Sistema de Composta con Lombriz. *Información Tecnológica*, 24(2), 47–56. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200007>
- Russo, M. A., O'Sullivan, C., Rounsefell, B., Halley, P. J., Truss, R., & Clarke, W. P. (2009). The anaerobic degradability of thermoplastic starch: Polyvinyl alcohol blends: Potential biodegradable food packaging materials. *Bioresource Technology*, 100(5), 1705–1710.
- Sabbah, M., & Porta, R. (2017). Plastic Pollution and the Challenge of Bioplastics. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 2(3), 111. <https://doi.org/10.15406/jabb.2017.02.00033>
- Sharma, S., Majumdar, A., & Butola, B. S. (2021). Tailoring the biodegradability of polylactic acid (PLA) based films and ramie- PLA green composites by using selective additives. *International Journal of Biological Macromolecules*, 181, 1092–1103. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.108>
- Shi, Q., Chen, C., Gao, L., Jiao, L., Xu, H., & Guo, W. (2011). Physical and degradation properties of binary or ternary blends composed of poly (lactic acid), thermoplastic starch and GMA grafted POE. *Polymer Degradation and Stability*, 96(1), 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.10.002>
- Shirai, M. A., Olivato, J. B., Demiate, I. M., Müller, C. M. O., Grossmann, M. V. E., & Yamashita, F. (2016). Poly(lactic acid)/thermoplastic starch sheets: Effect of adipate esters on the morphological, mechanical and barrier properties. *Polimeros*, 26(1), 66–73. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2123>
- Silva, M., Molina-Sánchez, P., Aldás, M., Valle-Alvarez, V. (2018). Biopolymers based on polylactic acid and starch: an alternative for the preservation of the environment. *DYNA*, 93(6). 581. <https://doi.org/10.6036/8917>
- Smits, A. L. M., Kruiskamp, P. H., van Soest, J. J. G., & Vliegthart, J. F. G. (2003). Interaction between dry starch and plasticisers glycerol or ethylene glycol, measured by differential scanning calorimetry and solid state NMR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, 53(4), 409–416. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00119-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00119-X)
- Soares, F. C., Yamashita, F., Müller, C. M. O., & Pires, A. T. N. (2013). Thermoplastic starch/poly(lactic acid) sheets coated with cross-linked chitosan. *Polymer Testing*, 32(1), 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.09.005>
- Thilagavathi, S., Gomathi, V., & Kumar, K. (2018). An approach to Low density polyethylene (LDPE) biodegradation by *Xylaria* sp. from termite garden. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(2), 2408–2411.
- UNEP. (2018). *Exploring the potential for adopting alternative materials to reduce marine plastic litter* (First). United Nations Environment Programme (UNEP).
- Wang, N., Yu, J., Chang, P. R., & Ma, X. (2008). Influence of formamide and water on the properties of thermoplastic starch/poly(lactic acid) blends. *Carbohydrate Polymers*, 71(1), 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.025>
- Ning W., Xingxiang Z., Na H., & Jianming F. (2010). Effects of Water on the Properties of Thermoplastic Starch Poly(lactic acid) Blend Containing Citric Acid. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 23(1), 19–34. <https://doi.org/10.1177/0892705708096549>
- Webb, H. K., Arnott, J., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2013). Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). *Polymers*, 5(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym5010001>
- Wilfred, O., Tai, H., Marriott, R., Liu, Q., Tverezovskiy, V., Curling, S., ... & Wang, W. (2018). Biodegradation of Polyactic Acid and starch composites in compost and soil. *International Journal of Nano Research*, 1(2), 1–11.
- Wittaya, T. (2012). Rice Starch-Based Biodegradable Films: Properties Enhancement. En A. A. Eissa (Ed.), *Structure and Function of Food Engineering* (First, pp. 103–134). InTech. <https://doi.org/10.5772/47751>
- Xiao, L., Wang, B., Yang, G., & Gauthier, M. (2012). Poly(Lactic Acid)-Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications. En D. Ghista (Ed.), *Biomedical Science, Engineering and Technology* (First, pp. 247–282). InTech. <https://doi.org/10.5772/23927>
- Xiaofei, M., Jiugao, Y., & Jin, F. (2004). Urea and formamide as a mixed plasticizer for thermoplastic starch. *Polymer International*, 53(11), 1780–1785. <https://doi.org/10.1002/pi.1580>
- Xiong, Z., Li, C., Ma, S., Feng, J., Yang, Y., Zhang, R., & Zhu, J. (2013). The properties of poly(lactic acid)/starch blends with a functionalized plant oil: Tung oil anhydride. *Carbohydrate Polymers*, 95(1), 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.054>
- Xiong, Z., Yang, Y., Feng, J., Zhang, X., Zhang, C., Tang, Z., & Zhu, J. (2013). Preparation and characterization of

poly(lactic acid)/starch composites toughened with epoxidized soybean oil. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 810–816. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.09.007>

- Yang, S., Madbouly, S. A., Schrader, J. A., Srinivasan, G., Grewell, D., McCabe, K. G., Graves, W. R. (2015). Characterization and biodegradation behavior of bio-based poly(lactic acid) and soy protein blends for sustainable horticultural applications. *Green Chemistry*, 17(1), 380–393. <https://doi.org/10.1039/c4gc01482k>
- Yew, G., Mohd Yusof, A., Mohd Ishak, Z., & Ishiaku, U. (2005). Water absorption and enzymatic degradation of poly(lactic acid)/rice starch composites. *Polymer Degradation and Stability*, 90(3), 488–500. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.04.006>
- Zeng, J. B., Li, K. A., & Du, A. K. (2015). Compatibilization strategies in poly(lactic acid)-

polymers, and greater durability composites based on agroindustry wastes.



María Belén Aldás, Chemical Engineer and Master in Environmental Engineering (National Polytechnic School), where she works as a full-time Professor in the Department of Civil and Environmental Engineering. She has participated in multi-interdisciplinary projects. She is the author and co-author of several publications in journals and conferences.

BIOGRAPHY



adhesively bonded joints at Fraunhofer EMI.

Pamela Molina, studied Agro-industrial Engineering at Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. She received her Master of Science in Sustainable Systems Engineering from Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Germany. She has participated in research projects related to bio-based polymers at CIAP-EPN and recycling of



Erick Proaño, Environmental Engineer (National Polytechnic School) and Master in Integrated Management Systems for Risk Prevention, Quality, Environment and Social Responsibility (International University of La Rioja). He currently works as Environmental and Safety Advisor.



EPN, she also collaborates in research projects developed in CIAP-EPN in the field of biopolymers.

Gabriela Silva, studied Agro-industrial Engineering at Escuela Politécnica Nacional. In 2020 she got her Master Degree in Food Research, Development and Innovation by University of Barcelona, Spain. Currently she is working as a Laboratory Technician in the Food Science and Biotechnology Department-



research fields are material processing, bio-based

Vladimir Valle, received his MSc in Advanced Materials Science and Engineering from Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain and Luleå University of Technology, Luleå, Sweden. He is currently a researcher at Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros-Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. His

Adaptación Planificada de las Viviendas Tradicionales ante Eventos Hidrometeorológicos Extremos en los Pueblos Originarios en el Gran Chaco Boliviano

Rojas, Juan¹  ; Zúñiga, Libys² 

¹University of the West of England, Architecture and the built environment, Bristol, Reino Unido

²Universidad de Holguín, Departamento de construcciones, Holguín, Cuba

Resumen: Las afectaciones ocasionadas por eventos hidrometeorológicos extremos de origen natural como sequías e inundaciones en las viviendas tradicionales en la provincia del Gran Chaco en Bolivia son frecuentes. En ellas inciden las técnicas de construcción usadas, los materiales de construcción empleados, la localización y el diseño de las viviendas, porque no resisten a las amenazas de dichos eventos extremos. Estos aspectos comprometen el hábitat de las poblaciones que las ocupan. Es por ello que esta investigación propone desarrollar desde las bases teóricas de la adaptación planificada como componente de la resiliencia urbano-territorial, la mejora de los sistemas socio-ambientales ante los efectos de los eventos hidrometeorológicos extremos a través de dichas viviendas tradicionales. Es desde la investigación cualitativa que se apoya esta pesquisa para reconocer variables y atributos apoyados desde los enfoques interdisciplinar y sistémico. Los mismos que permiten conectar la relación entre las afectaciones climáticas y los pueblos originarios, buscando desde la práctica social la mejora de las viviendas mediante soluciones ingeniería amparadas en un grupo de regulaciones territoriales en el ámbito rural, así como en la construcción de políticas públicas desde el ente regulador correspondiente.

Palabras clave: Adaptación planificada, eventos hidrometeorológicos extremos, pueblos originarios, Gran Chaco

Planned Adaptation of Traditional Dwellings to Extreme Hydrometeorological Events in Indigenous Peoples in the Bolivian Gran Chaco

Abstract: The effects caused by extreme hydrometeorological events of natural origin such as droughts and floods in traditional houses in the province of Gran Chaco in Bolivia are frequent. The construction techniques used, the construction materials used, the location and the design of the houses affect them, because they do not resist the threats of said extreme events. These aspects compromise the habitat of the populations that occupy them. That is why this research proposes to develop, from the theoretical bases of planned adaptation as a component of urban-territorial resilience, the improvement of socio-environmental systems in the face of the effects of extreme hydrometeorological events through these traditional dwellings. It is from qualitative research that this research is supported to recognize variables and attributes supported from interdisciplinary and systemic approaches. The same ones that allow connecting the relationship between the climatic effects and the native peoples, seeking from social practice the improvement of housing through engineering solutions covered by a group of territorial regulations in the rural area, as well as the construction of public policies from the corresponding regulatory body.

Keywords: Planned adaptation, extreme hydrometeorological events, native peoples, Gran Chaco

1. INTRODUCCIÓN

Una de las reacciones del planeta tierra frente a las agresiones de los seres humanos es el cambio climático (eventos hidrometeorológicos). El origen del cambio climático se encuentra en la emisión masiva a la atmósfera de los llamados gases de efecto invernadero, los cuales han sido parte

fundamental para el desarrollo, evolución y continuidad de todo ser vivo, sin el cual el planeta Tierra se enfriaría, y no sería apto para la vida (Ochoa et al., 2015).

El concepto del cambio climático es manejado y planteado por una variedad de diversos autores (Bárcena et al., 2019; Castro et al., 2014 y Medina, 2016) que encuentran similitud al

*mark_3214@hotmail.com

Recibido: 24/06/2022

Aceptado: 28/02/2023

Publicado en línea: 01/05/2023

10.33333/rp.vol51n2.04

CC 4.0

conceptualizarlo como la alteración y (o) variación del clima en el planeta Tierra causado por el incremento de la temperatura media mundial resultado de factores de origen natural y de la actividad del ser humano. Esto conlleva a perturbar y (o) afectar los elementos que componen la capa atmosférica en adición al proceso natural de alteración del clima en periodos de tiempo observados y comparables, lo que provoca reducción y posible desaparición de los glaciares, impactos del alza del nivel del mar, incrementos de temperatura, disminuciones de precipitación (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015).

En la región del Chaco sudamericano, como se indica en la Figura 1, predominan los pueblos originarios como los Guaraníes, Tobas y Weenhayek. Estos pueblos se encuentran disgregados en todo el Chaco (Bolivia, Paraguay, Argentina y parte del Brasil), en cercanías de fuente de aguas como ríos, atajados, entre otros; así como también en áreas urbanas a causa de la migración forzada por motivos como pérdida de sus territorios, búsqueda de alimentos, entre otros.



Figura 1. Región Chaco Sudamericano. Adaptado de Fundación Proyungas, 2018

En el caso de los Weenhayek viven en cercanías a las riberas del río Pilcomayo y Bermejo en la provincia Gran Chaco dentro del departamento de Tarija (Bolivia), Provincia Chaco, Salta y Formosa (Argentina), y parte del Paraguay, con una población aproximada de 55.000 habitantes. Estos pueblos comparten usos, costumbres y culturas. Entre sus costumbres se tiene: empleo de materiales propios del lugar y técnicas constructivas autóctonas o propias; recolección de frutos y pesca como actividades económicas principales para su vivencia; tejido artesanal con plantas del lugar; y transmisión de saberes de forma oral de generación en generación, entre otras.

Estos pueblos originarios del Gran Chaco boliviano son los más frágiles ante las variantes climáticas porque además de comprometer su entorno ocasiona que recurran al empleo de métodos y procedimientos constructivos ajenos a sus costumbres y ocupen viviendas muchas veces improvisadas construidas con materiales contemporáneos, algunas de ellas dentro de programas de viviendas sociales como respuesta a

las viviendas afectadas por las inclemencias climáticas. Dentro de los daños principales a las poblaciones originarias, se tienen:

- Inundaciones, que afectan a numerosas familias por el colme del afluente del Pilcomayo, a razón de las partículas de suelo desplazadas desde la cordillera del Aguarague que produce el estancamiento y abarrotamiento de las mismas (sedimentos) por las constantes precipitaciones en época de lluvia. Estas colmataciones se consideran parte del ciclo natural, ya que su lecho se ve incrementado con los años, afectando de gran manera la habitabilidad en las proximidades del río Pilcomayo.
- Sequías, que afectan los materiales de construcción que se utilizan en las viviendas tradicionales, ya que los deseca en extremo como es el caso del barro, empleado en paredes y cubiertas, donde se producen fisuras y desprendimiento del mismo. Lo que reduce la durabilidad de la vivienda en el transcurso del tiempo.

En zonas y estaciones establecidas del año, la alternancia de precipitaciones, que producen las crecidas del río afectan las estructuras de las viviendas ya que dispara la descomposición de los elementos que conforman los distintos materiales que las componen, lo que provocan pudrición y aumento de hongos debido a las altas humedades. También arrastra cuestiones estructurales de magnitud considerable como ser el desgaste de recubrimiento de barro u otro material, y expone a las inclemencias del tiempo a las ramas y (o) palos que la conforman que al estar expuestos sufren cambios en cuanto a su resistencia, elasticidad, dureza, entre otros. La vida útil de los elementos de la vivienda es muy limitada.

Entre las construcciones más afectadas por los eventos hidrometeorológicos, se tiene aquellas pertenecientes a las originarias, tradicionales y (o) vernáculas, a razón de factores varios como los índices de pobreza, el desplazamiento de sus territorios de origen, la no adaptación de sus viviendas a las condiciones climáticas actuales, entre otros. Es por ello, que la presente investigación tiene como objetivo proponer el desarrollo o implementación de la adaptación planificada como componente de la resiliencia urbano-territorial para la mejora de los sistemas construidos tradicionales socio-naturales ante las afectaciones producto de los eventos hidrometeorológicos extremos en la región del Gran Chaco boliviano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación ha sido desarrollada con base en las concepciones interdisciplinarias desde un enfoque sistémico para tratar la resiliencia desde la adaptación planificada de los sistemas construidos de los pueblos originarios ante los eventos hidrometeorológicos desde los métodos teóricos y empíricos de la investigación científica, los que se detallan a continuación:

Dentro de los métodos teóricos, se estudiaron los componentes del riesgo. La definición de riesgo fija una posición de intervalo entre la certeza o certidumbre y asolamiento, a razón

de que la estimación del riesgo está determinada por la razón y la acción que involucra al ser humano. La Oficina del Sistema de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres establece parámetros que inciden e influyen en el estudio e indagación del riesgo (Oficina del Sistema de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres [Unisdr], 2009). De esta manera, se llega a establecer tres tipos de amenazas acorde a su causa o procedencia tales como ser de origen natural, antrópico, y socio natural (Zúñiga, 2012).

La vulnerabilidad se establece como una parte que compone el riesgo, la cual el Intergovernmental Panel on Climate Change conceptualiza como la inclinación, instinto o tendencia para ser alterado de una forma dañina, que involucra definiciones, herramientas y componentes que implican factores sensibles o de carácter susceptibles a lo negativo, y la inexistencia de réplica y adaptación (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). La vulnerabilidad, está conformada por elementos que limitan y están influenciadas por la exposición, la susceptibilidad y de la resiliencia. La exposición es la posición o ubicación de desventaja, debido al posesionamiento del individuo, cosa o sistemas que se encuentra exhibido al riesgo (Unisdr, 2009). La susceptibilidad para Chacón (2008), es la que hace referencia a la limitación del espacio físico de factores que interactúan con las situaciones de inseguridad, sin que signifique influencias ocasionales. La resiliencia, elemento último de la vulnerabilidad que se aplica según el área en la que se usa, la situación a la que hace referencia, del objeto y el nivel de estudio o investigación (Rebotier et al., 2013). De este modo, para conservar las competencias de la resiliencia en todo sistema y reflejar estabilidad de alguna forma se debe controlar la resiliencia (Zúñiga, 2017). Por lo que, Unisdr (2009) la conceptualiza como la capacidad o competencia de los sistemas, comunidades o sociedades sometidas a una amenaza o peligro para absorber, adaptarse y recuperarse de sus afectaciones en forma óptima y eficiente, que involucra el preservar y restaurar sus componentes y funciones esenciales.

También se asociaron análisis vinculados al desarrollo de una vivienda tales como: localización, diseño, materiales y técnicas de construcción en la región iberoamericana, cuyos resultados fueron el rescate en la arquitectura vernácula y los elementos de confort bioclimático. Es desde esta perspectiva que existe una tendencia mundial al análisis del cambio climático a través de su asociación con los riesgos que estos producen. En ese mismo sentido, se analizó todo lo concerniente a la adaptación planificada como concepto clave y cualidad de la resiliencia en aras de mantener la identidad cultural de dicho pueblo originario.

Para ello, se estudiaron un total de 39 autores en busca de llegar a un consenso sobre las cualidades que definen a la resiliencia (Aguilar, 2020; Altieri et al., 2015; Ávila y Gonzáles, 2015; Bahadur et al., 2010; Baró y Monroy, 2018; Camarero y Del Pino, 2014; Clerc y Díaz, 2016; Del cura y Quintero, 2016; Doring et al., 2013; Fisichelli et al., 2016; Gonzáles et al., 2019; González y Maldonado, 2017; Grupo de las Naciones Unidas para el Desarrollo ([UNDG], 2009); Guarino y Pironto, 2019; Hardy et al., 2019; Holling, 1973; Jiménez, 2013; Kenneth et al., 2015; Leichenko, 2011; Levinea et al., 2016; Magrin, 2015; Papa et al., 2015; Peredo y Vela, 2016; Pickett et al., 2014; Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2011; Pradilla, 2016; Quevedo, 2017; Quinlan et al., 2016; Rivero, 2017; Rodríguez, 2018; Sánchez et al., 2016; Sandoval, 2020; Sepúlveda, 2015; Shaikh y Saidul, 2016; Skerk et al., 2014; Timpane et al., 2017; UN-Habitat, 2016; Uriarte, 2010 y Vides-Almonacid, 2014) y mediante el procesador Ucinet for Windows: Software for Social Network Analysis [Ucinet], versión 6.710 (Borgatti et al., 2002) empleado también dentro de los métodos empíricos, se procesó la información a través de la correlación entre variables identificada en los referidos autores. Como resultado observa que “capacidad” es el término de mayor referencia que cualifica la resiliencia. En menor medida se identifican los términos de “capacidad de adaptación” y “adaptación”, como se indica en la Figura 2.

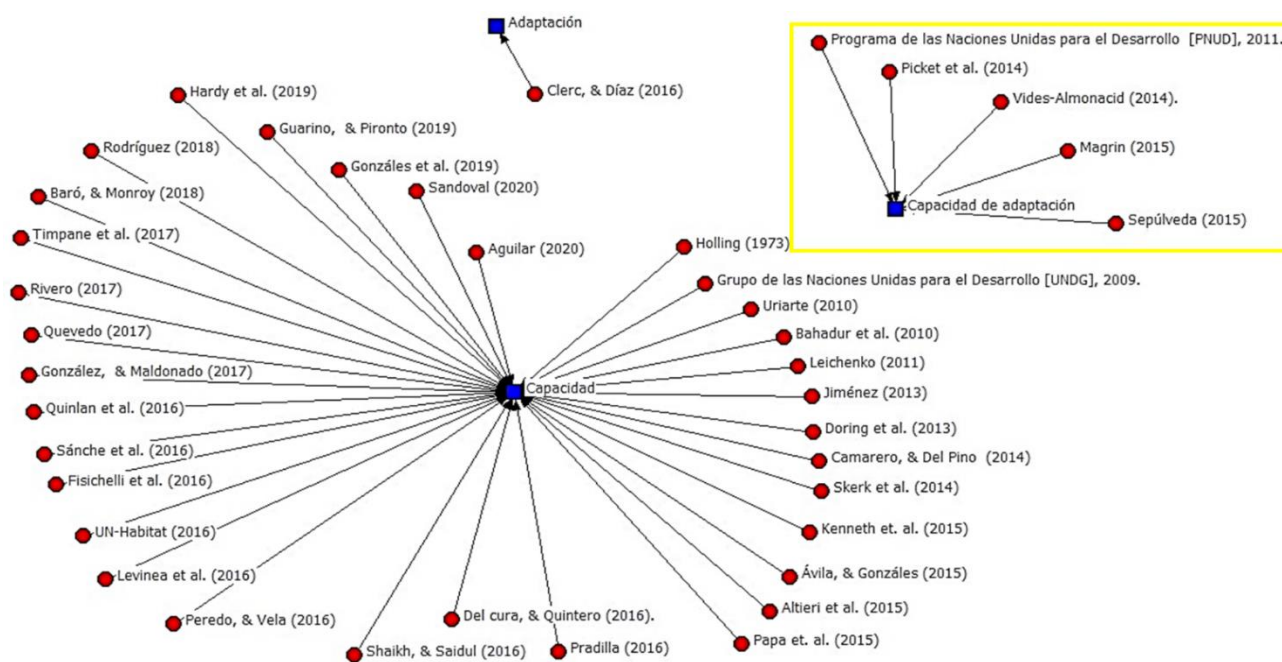


Figura 2. Cualidades de la resiliencia.

Esto significa que la adaptación en la actualidad es poco tratada, no obstante, la variable “capacidad” se analiza como complemento desde la generalidad de los sistemas; sin embargo, esta investigación considera pertinente que la “capacidad de adaptación” a modo de complemento directo de esa capacidad califica en términos de interdependencias a los cuales los sistemas deben tener como propiedad intrínseca. La capacidad de adaptación a manera de cualidad de la resiliencia como medida de la estabilidad de cualquier sistema, es la que puede ayudar a contrarrestar los efectos de eventos externos porque intrínsecamente se muestra como coadyuvante desde perspectivas socio-ambientales a la mejora de la estabilidad de la condición humana en regiones que son amenazadas por dichas circunstancias. Desde esa perspectiva, Lara y Vides-Almonacid (2014) consideran la adaptación como el ajuste de un organismo, y como la comprensión y transformación del entorno cambiante a través de la cultura.

Se aplicaron métodos empíricos (entrevista, encuesta y observación científica), a través del análisis de la sistematización de la información recopilada y la interacción directa sobre las afectaciones de eventos hidrometeorológicos sobre la base de las técnicas de construcción empleada por este pueblo y su durabilidad. Para lo cual, se partió del principio que la resiliencia es imbricada a la adaptación planificada, por lo que se demanda de información empírica propia de los pueblos originarios en la provincia del Gran Chaco en Bolivia para realizar dicha adaptación. Se tomó como muestra siete viviendas, de las 22 viviendas de carácter tradicional que ocupan los pueblos originarios en la jurisdicción de D’orbigny, que representa a la vez el 10 por ciento de las viviendas ocupadas por este pueblo. También, se entrevistaron 22 pobladores que ocupan viviendas tradicionales y se realizó una observación directa a otras 10 viviendas del área en cuanto a su localización, diseño, materiales y técnicas constructivas que establecen como características comunes dichas viviendas. En el procesamiento de datos, se obtuvo que entre las principales afectaciones a este tipo de construcciones se vincula el material que se emplea en el desarrollo de la vivienda y el sistema constructivo utilizado. En este sentido, el sistema constructivo húmedo (quincha o picado de barro) y seco (palo a pique), que emplea materiales de construcción como paja, caña, cuero, ramas, arena, limo, arcilla ante altas temperaturas y humedad se comporta de la siguiente forma:

- Por acción del agua (precipitaciones, inundaciones, retención de aguas, entre otros), se produce: desgaste de los materiales que componen la vivienda (ramas, barro, tierra, entre otros), socavación de los cimientos, hundimiento y pudrimiento de maderas, arbustos y ramas en contacto con el suelo, vencimiento de las cabreadas (vigas de madera propia del lugar) por acción del sobrepeso del agua en las tortas de barro, saturación de los materiales por humedad, quebrantamientos, agrietamientos, hendiduras y roturas de distintos elementos constructivos de la vivienda (Hábitat para la humanidad Argentina – SAMSUNG [HHA-S], 2016).
- Las temperaturas elevadas (sequías, olas de calor y (o) calores extremos), producen secado excesivo de los materiales térreos debido al clima seco circundante,

debilitando la cohesión de sus partículas, lo que genera hendiduras, rajaduras, fisuras, agrietamientos y desprendimientos en los distintos elementos que conforman las estructuras y (o) construcciones de la vivienda.

De esta manera, estos aspectos permiten apreciar que no existe una correlación armoniosa entre lo construido y el medio que los rodea bajo las condiciones de los eventos hidrometeorológicos, además de que constituyen bases teórico-prácticas a investigar que aporten una alternativa para el empleo de materiales y técnicas tradicionales de construcción, criterios de localización y de diseño de la vivienda adaptadas planificadamente a las condiciones que el cambio climático impone en la actualidad, de forma tal, que ayuden a garantizar el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y el bienestar social de dichos pueblos mediante la adaptación planificada en la región que se estudia en particular.

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

La adaptación se estructura en dos grupos: la adaptación autónoma y la planificada (ONU, 2015). En el primer caso, esta misma organización mundial la define como los ajustes realizados por los ecosistemas y los humanos sin intervención externa en respuesta a un entorno cambiante, donde todos los sistemas (sociales y ecológicos) tienen cierta capacidad de adaptación autónoma. En cuanto a la adaptación planificada, es una intervención humana deliberada con la intención de aumentar la capacidad del sistema para sobrevivir y funcionar en un nivel aceptable bajo las condiciones climáticas de un sitio específico (ONU, 2015). Entender la capacidad de adaptación como una función de la resiliencia es un tema poco tratado en la literatura consultada hasta la etapa de este autor (Magrin, 2015; Picket et al., 2014; PNUD, 2011; Sepúlveda, 2015 y Vides-Almonacid, 2014) al cual es necesario realizar un desarrollo conceptual, que ayuda a esclarecer el papel de la adaptación. Para concretizar, la resiliencia de los sistemas socio naturales ante el cambio climático es una capacidad de adaptación que puede ayudar a contrarrestar y (o) afrontar sus efectos. Sobresale que esa adaptación tiene que ser indudablemente planificada mediante la planificación territorial como práctica de anticipo para disminuir riesgos, y a la vez, fomentar bienestar; por lo que no solo es un ciclo de reducción de vulnerabilidad, sino también que señala modos para aumentar las oportunidades (Barton, 2009).

La planificación territorial es una rama científica, que desenvuelve ciertas técnicas del área administrativa, y de varios tipos de políticas. La base de su enfoque es el desenvolvimiento equilibrado de los territorios mediante la planificación y el orden de su espacio físico (Consejo de Europa [CE], 1983). Considera además que, a partir de la adaptación planificada se exigen los principales esfuerzos para la mejora de los sistemas construidos, elemento base del desenvolvimiento de la vida del ser humano. Los sistemas construidos son esenciales y permanentes al espacio, y componen edificaciones (construcciones) que están al servicio del ser humano, como las viviendas, las edificaciones asociadas, las aceras, espacios de recreación, entre otros. De

ese modo, la connotación de la resiliencia referente a los sistemas socio naturales frente al cambio climático se presenta como la capacidad de adaptación planificada donde intervienen perspectivas físico espaciales y socio políticos de cualidad relacional, abierta, transitoria regida por el espacio y el tiempo en que vive la población involucrada, como elemento de estabilidad de la situación del ser humano en zonas que son conminadas por eventos hidrometeorológicos extremos establecidos producto del clima, aspectos inherentes a la planificación urbano territorial.

A partir de este punto de vista, mediante la adaptación planificada de la resiliencia que considera lo territorial, lo espacial y los sistemas construidos, se conduce a situaciones que contribuya y asista a preservar, rescatar y consolidar las construcciones tradicionales de las poblaciones autóctonas o propias del Gran Chaco boliviano. A partir de ello, con base en los datos recolectados se desarrollan alternativas para el desarrollo del hábitat de los pueblos originarios, como el pueblo originario Weenhayek, las cuales son: localización de la vivienda, diseño de vivienda, material de construcción y técnica de construcción.

a) Localización de la vivienda

Valora a través de un grupo de parámetros, las condiciones del lugar de emplazamiento de la vivienda (ubicación), dentro de los límites de los territorios originarios en la provincia del Gran Chaco en Bolivia. Evalúa también el espacio físico del área de la vivienda a ocupar, su dimensión y orientación para aprovechar las condiciones ambientales naturales favorables (condiciones bioclimáticas), que permiten un ambiente de agrado y garantiza la sostenibilidad de hábitat de quienes habitan la vivienda (donde la orientación de las viviendas debe ser del sureste desde donde provienen las brisas predominantes para contrarrestar el clima cálido circundante). Esto conlleva a la evaluación del asentamiento de la vivienda en referencia a las vías de acceso (en caso de que exista un camino cerca, el derecho de vía del Estado boliviano), constituido por la franja de terreno a cada lado de la vía, es de treinta metros, la distancia al río, donde el bien municipal de dominio público o propiedad del Estado es de hasta 25 metros a cada lado del borde de máxima crecida, riachuelos, torrenteras y quebradas con sus lechos, aires y taludes hasta su coronamiento (Estado Plurinacional de Bolivia, 2014), los claros en el bosque según la densidad arbórea la cual es alta cuando tiene valor mayor o igual a 200 árboles por hectárea, entre otros, que disminuye los riesgos naturales a los que se encuentra expuesta la vivienda como se indica en la Figura 3.

b) Diseño de la vivienda

Establece mediante un conjunto de parámetros a tener en cuenta, como el área del terreno que ocupa la vivienda, la cual debe tener dimensiones de 18 metros de frente por 20 metros de largo, para un área de 360 m², de la cual se debe dejar un mínimo de 20-30 por ciento del área libre de construcciones, la cantidad y dimensiones de los espacios componentes de la vivienda, según la dependencia y conexión con normativas establecidas a nivel gubernamental, donde el área mínima de la vivienda está relacionada con la cantidad de habitaciones,

donde para un dormitorio la vivienda debe ser de 45 a 55 m², conformada por un dormitorio de cuatro por tres metros, un espacio semi abierto o portal (sala estar-comedor) de siete por tres metros, una cocina de tres por tres metros y un baño de dos por dos metros, para un total de 46 m² construidos. Estos valores se encuentran normados según el Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda (2020), como se indica en la Figura 4.

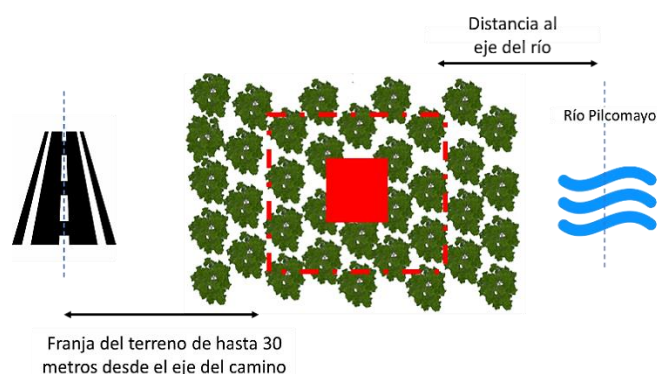


Figura 3. Localización de la construcción en un área con densidad arbórea

Este ministerio considera el acondicionamiento bioclimático del lugar de acuerdo con las condiciones climáticas predominantes en la región (sequía e inundaciones) e incorpora elementos bioclimáticos a manera de garantizar condiciones mínimas de habitabilidad con soluciones óptimas de salubridad, comodidad y confort como la previsión de un espacio abierto o patio es un fenómeno bioclimático que interviene directa e indirectamente en el acondicionamiento de la vivienda para lo cual se dispone de un estanque de agua, en donde la evaporación que originan las plantas y el agua hace descender la temperatura del patio, creando una zona de altas presiones que succiona el aire que se encuentra por encima de él, donde las ventanas expuestas permitan el paso del aire fresco del patio al interior de la vivienda. En verano, el patio acondiciona el aire enfriándolo y humedeciéndolo antes de su ingreso a la vivienda. Por otro lado, el diseño permite que se tenga en la cubierta la previsión de circulación de aire circulación de aire a través de las rejillas de ventilación colocadas en todo el perímetro. Estas rejillas pueden ser de 10 centímetros de ancho por 20 centímetros de largo o según las dimensiones comerciales de la zona, además de la previsión de aislamiento térmico debajo la cubierta en base a polipropileno protege contra el calor en verano y conserva el calor durante el invierno.

c) Materiales de construcción de la vivienda

Revisa mediante las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales de construcción, la adaptabilidad de dichos materiales a las condiciones climáticas extremas en la provincia del Gran Chaco como las sequías y las inundaciones como esencia para la conservación de las viviendas desde una adaptación planificada. Los materiales empleados mejoran la estabilidad, durabilidad y rigidez de la estructura en general (cimientos, paredes, cubierta, áreas de aseo y piso). Estos materiales se caracterizan por:

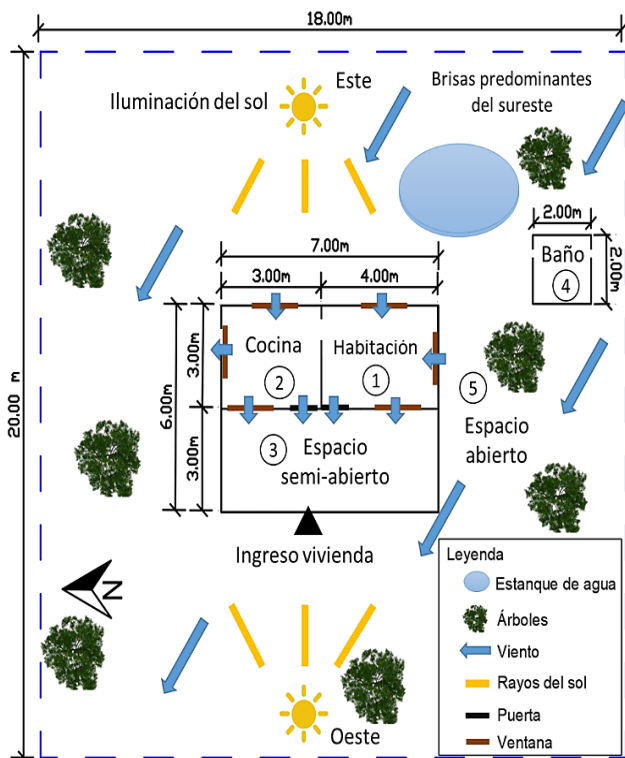


Figura 4. Parámetros bioclimáticos a considerar en el diseño de la vivienda de una habitación según su orientación

- Ser de origen natural como:

- madera de peso específico mayor a 0.80 kg/dm^3 , de peso pesado, dureza dura y resistente o muy resistente bajo tierra;
- tierra natural de procedencia sedimentaria con textura de predominancia arcillosa, con presencia de arena y limo, de estructura granular, consistencia rígida, de gran capacidad de retención de agua, con grado de compactación y permeabilidad variable según su composición, de fácil manejo y moldeable según lo que se requiera, la cual ahorra energía y reduce la contaminación ambiental;
- tierra de relleno de origen calizo o con un contenido muy bajo de arcilla entre un 5 o 10 por ciento, a fin de lograr su estabilización mediante una compactación simple, preparado con partículas comprendidas entre 2 a 64 milímetros (grava) mezclado con tierra natural del lugar (sin capa vegetal) en un 50 por ciento de ambos materiales, con humedad óptima para alcanzar el grado de compactación que se requiera, de menor absorción de humedad y grado de compactación mayor;
- agua de color incolora, sabor insípido y olor inodoro, de densidad de 1 g/cc a 4°C , con elevada acción disolvente en mezcla con otras sustancias o materiales debido a la capacidad que posee de formar puentes de hidrógeno con otras sustancias polares e iónicas, de elevada fuerza de cohesión entre sus partículas que no permite la reducción de su volumen

por presión, de gran calor específico, es decir, necesita de mucha energía para elevar su temperatura, lo cual la convierte en un buen aislante térmico, lo que permite servir de protección frente a cambios bruscos de temperatura, actuando como termorregulador ya que regula los cambios térmicos ambientales y corporales;

- aceite de linaza para construcción en la madera conserva y mantiene las propiedades de la madera, previene hongos e inserción de insectos; previene el resecamiento ya que humecta la madera, protege de rayos ultravioletas y sella los poros, protege de humedad gracias a sus propiedades hidrófugas; y reaviva el color y destaca las vetas naturales, no es tóxico ni nocivo; barro mezcla moldeable de tierra y agua, con capacidad de absorción de hasta 300 gr/m^2 cada 48 horas, de color variable según las impurezas que contiene la tierra con la que se prepara, va desde rojo anaranjado hasta el blanco cuando es puro, de alta plasticidad cuando se prepara y alta durabilidad cuando seca, de fácil trabajabilidad, de coste económico bajo, de bajo contenido de humedad aproximadamente de 0.4 – 6 por ciento;
- ancoche (*Vallesia glabra*), arbusto ramificado de ramas varias, delgadas y rígidas, de hasta tres metros de altura que crece en la provincia del Gran Chaco en Bolivia; de hojas alargadas, pequeñas y el anverso de color verde pálido y como aterciopeladas, que colocadas unas juntas a otras suelen conformar una barrera contra la luz e inclemencias climáticas, de fácil acceso y de coste bajo, ya que crece en el monte chaqueño, cumple la función de estabilizador por fricción del barro, que controla el desplazamiento, dilatación y retracción durante el secado de las partículas del suelo;
- tejido de fibras naturales de Caragatá o Chaguar (*Bromelia hieronymi*), planta textil que se obtiene en las regiones chaqueñas, de acceso abierto, sin ningún tipo de norma que regule su uso y aprovechamiento, de alta durabilidad en el tiempo y alta resistencia que se emplea para la fabricación de redes de pesca, bolsas, cuerdas, sogas, hamacas, mantas y diversas vestimentas;
- grama, conocida como césped, agramen o gramón, que crece en las llanuras chaqueñas, de tallo rastrero y forma cilíndrica, con nudos y hojas cortas, de flores organizadas en espigas. Tiene la función de estabilizante por fricción, que controla el desplazamiento, dilatación y retracción durante el secado de las partículas del suelo (barro o adobe). Conforman una especie de “red” a la que se adhieren las partículas del suelo y que controla su desplazamiento, dilatación y retracción durante el fraguado (García, 2017); y
- estiércol de animales, excremento de animales compuesto por uno o más desechos orgánicos, de

origen natural, usado como estabilizador más común, valioso principalmente por su efecto reforzador (debido a las partículas fibrosas) que controla el desplazamiento, dilatación y retracción durante el secado del barro (García, 2017). Mejora la estructura y conductividad hidráulica del suelo, y contiene gran cantidad de nutrientes como el nitrógeno, entre otros, que nutre el suelo; entre otras.

- Ser de origen sintético, como:

- Geotextil, material textil sintético plano formado por fibras poliméricas (polipropileno, poliéster o poliamidas, similar a una tela, de gran deformabilidad, se emplea en aplicaciones geotécnicas (en contacto con tierras y rocas). Entre sus funciones se tiene separación o filtración de sustancias o elementos, drenaje, refuerzo o impermeabilización, de alta resistencia mecánica a la perforación y tracción, permeable y de alta flexibilidad. Protege, impide que se produzcan daños mecánicos de abrasión o punzonamiento. Así también refuerza la superficie de contacto, y mejora las propiedades mecánicas y disminuye el nivel de cargas sobre el terreno porque realiza un trabajo de homogeneizar las cargas sobre una superficie extensa;
- Thinner compuesto por una mezcla de disolventes orgánicos derivados del petróleo que ha sido preparado para disolver sustancias insolubles en agua, como aceites, pinturas, entre otras. Sustancia líquida incolora de olor característico, insoluble en agua, de viscosidad no determinada y punto de ebullición entre 56 y 136 °C;
- malla de propileno o geo malla, materiales geo sintéticos de superficie uniforme formada principalmente por poliéster, polipropileno y/o polietileno de alta intensidad presentadas en forma de rectángulo en forma de tiras y unidas por un punto llamado nodo. Aumenta la capacidad de carga del material que cubre. De fácil instalación, reduce el volumen de los materiales y mantiene el aspecto natural. Alarga la vida útil del material con el que trabaja y reduce la aparición de grietas. Al envolver a las paredes de adobe y (o) barro la hacen más resistentes y evita que se caigan durante movimientos de la tierra o agentes externos como vientos. Aporta un mejor soporte y distribuye la carga uniformemente en un área mayor, por lo que se usa para reforzar y estabilizar suelos blandos, terraplenes, taludes y muros, entre otros;
- calamina pre pintada ondulada, elementos de acero galvanizado de distintas formas planas, onduladas, trapezoidales, muy empleados en la construcción. Son resistentes al agua, óxido y hongos. Resistentes a la corrosión atmosférica a largo plazo, de alta resistencia a elevadas temperaturas, de bajo coste económico. Presenta buena trabajabilidad, de espesor

y peso variable. La calamina número 26 tiene un espesor de 0.43 milímetros y un peso de 3,10 kilogramos por metro lineal; aislante de polipropileno de alta resistencia mecánica, tanto al impacto como a la fatiga. Adecuado para trabajar a alta temperatura, con punto elevado de fusión (a alrededor de 160 °C). No se daña con la humedad debido a la baja absorción de humedad, de resistencia química a sustancias ácidas y alcalinas, de consistencia ligera, de acceso económico. Sirve como aislante eléctrico. Es reciclable; clavos, elementos de fijación metálica de punta filosa cuya función es fijar elementos de construcción. Son de diámetro y longitud variables, de fácil adquisición y de precios bajos. Presentan una resistencia de 14 kg, de fácil trabajabilidad;

- perno, pieza metálica y cilíndrica fabricada de acero o hierro de diferentes durezas o calidades. Presenta diferentes espesores y longitudes. De alta resistencia a elevadas temperaturas, empleado como elemento de unión, que se emplea en perforaciones que permiten unir y fijar cosas con gran resistencia a esfuerzos de corte; y
- clavos, elementos de fijación metálica de punta filosa cuya función es fijar elementos de construcción, de diámetro y longitud variables, de fácil adquisición y de precios bajos. Presentan una resistencia de 14 kg, y fácil trabajabilidad.

d) Técnicas de construcción de la vivienda

Examina las técnicas originarias y contemporáneas que han surgido y permanecido en esta región por décadas desde una adaptación a los eventos hidrometeorológicos. En los cimientos se tiene la técnica de entierro de horcones donde:

- se seca la madera exponiéndola al calor y al viento, evitando la humedad; se limpia la superficie y se coloca aceite de linaza dos veces, el mismo debe ser preparado con Thinner;
- excavar el cimiento de 0.60 por 0.60 metros por una profundidad de 1.10 metros desde el nivel de piso, donde debe apisonarse la superficie excavada, posteriormente se debe colocar el geotextil en toda la superficie excavada; y
- proceder al colocado del horcón para lo cual se debe rellenar una altura de cinco a diez centímetros con tierra, luego apisonar manualmente con ayuda de un contrapeso; ubicar el horcón de una longitud mínima de 3.50 metros de longitud mínima en el centro de la excavación controlando la centralidad. Luego, realizar el relleno con piedras colocadas manualmente y tierra proveniente de la excavación. Este material debe ser colocado en capas de 10 a 15 centímetros, mismas que deben ser apisonadas y (o) compactadas con un contrapeso hasta llegar a una altura de 90 centímetros. A medida que se va rellenando la excavación se debe asegurar la fijación del horcón. La geomalla que fue colocada en la superficie de excavación, debe envolver la cimentación de piedra y abrazar el

horcón hasta llegar a nivel de piso, como se indica en la Figura 5.

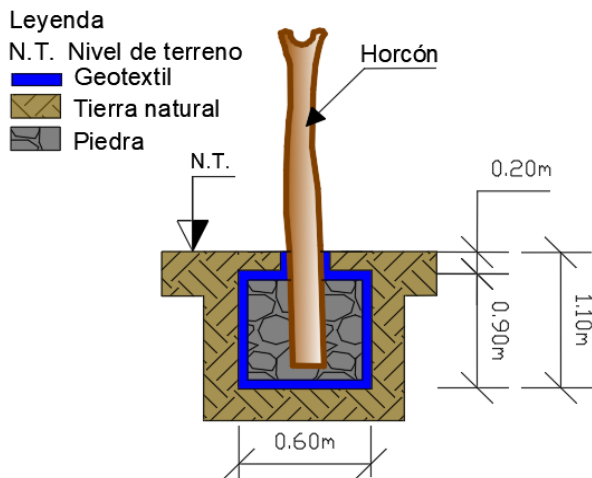


Figura 5. Conformación del enterrado del horcón según técnica del cemento

En las paredes, la técnica empleada consiste en:

- seleccionar la tierra para la preparación del barro, para lo cual debe ser sometida a análisis de laboratorio para la identificación del material óptimo para la conformación del barro; o emplear la prueba de la bolita para lo cual se debe tomar un poco de la tierra seleccionada húmeda y con las palmas de las manos formar cinco bolitas de aproximadamente dos centímetros de diámetro. Posteriormente, dejar secar las bolitas bajo sombra por dos días. Cuando las bolitas estén secas, hay que tratar de romperlas presionándolas con el dedo pulgar y el dedo índice. Si la bolita no se rompe la tierra es apta con suficiente arcilla que le darán la resistencia necesaria. De lo contrario, si la bolita se rompe la tierra no es apta y no tendrá la resistencia suficiente; o emplear la prueba del rollito para lo cual se debe tomar un poco de la tierra seleccionada húmeda y con las palmas de las manos formar rollitos de dos centímetros de diámetro aproximadamente. Si el rollo mide de cinco a quince centímetros, la tierra a utilizar es apta para emplearla ya que tiene la cantidad adecuada de arcilla y arena. Por el contrario, si el rollo se rompe antes de que mida cinco centímetros, la tierra tiene mucha arena y no es apta para el empleo, para lo cual hay que mejorarla. De último, si el rollo mide más de quince centímetros, la tierra tiene mucha arcilla, por lo cual tampoco es apta para el empleo y debe mejorarse;
- preparar el barro, para lo cual se debe tamizar la tierra usando una zaranda, ya que debe estar limpia, sin piedras, restos de plantas o basura; picar las gramas ramas de ancoches o bosta de animal; acomodar la tierra en pilas donde debe agregarse (seis medidas de tierra), echarle agua (media medida) y una medida de grama o ancoche o bosta de animal, hasta que se forme el barro, luego mezclar o batir la pila de materiales para lograr una argamasa. En caso de haberla preparado en un recipiente

con los pies o pala, esta mezcla debe dejarse reposar de 24 a 48 horas como mínimo; y

- preparados los materiales, sobre los horcones se deben colocar las vigas, mismas que deben ir sujetas sobre los horcones con clavos o sogas de fibra natural de Caraguatá, conformando una especie de arco entre ellos; escavar 30 centímetros de profundidad por 20 centímetros de ancho en toda la superficie demarcada donde irán las maderas que conformarán las paredes de la vivienda; limpiar la superficie excavada a manera de que quede uniforme y empezar a colocar las maderas una tras otras hasta el nivel de las cabriadas; colocar la geomalla en toda la superficie excavada sobre el nivel de piso; proceder al colocado de las maderas en forma continua una detrás de la otra presionando sobre el suelo y evitando los espacios vacíos entre ellas como se indica en la Figura 6.

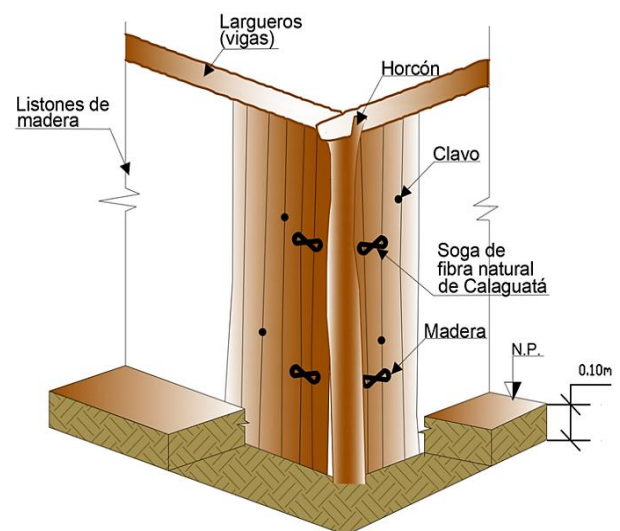


Figura 6. Colocado de maderas en forma continua

Se debe atravesar sobre ella, listones de grosor mayor a dos centímetros de forma horizontal cada un tercio de su altura. Estas maderas irán sujetadas entre ellas, al igual que en los extremos a los horcones y cabriadas con clavos o sogas de fibra natural de Caraguatá. Una vez colocada la madera, debe rellenarse la excavación realizada cuidando de no romper la geomalla colocada; se debe dejar libres los espacios donde irán las puertas y ventanas, es decir, no deberá colocarse madera; colocar o tarrajear el barro sobre la madera ya colocada en ambos lados en un espesor de tres centímetros como se indica en la Figura 7. Colocado el barro se debe sobreponer por toda la superficie de las paredes la geomalla por ambos lados continuando desde la base de la excavación hasta el nivel de las vigas. Las ventanas y puertas deben quedar libres de geomalla. Secado el barro, proceder al colocado de los marcos de puertas y ventanas. Luego, tarrajear barro sobre la geomalla por ambas caras con un espesor de un centímetro y medio a dos centímetros; colocado el barro, proceder a enlucir las paredes con un trozo de madera suave a manera de dejar una superficie lisa. Una vez secado el barro y se observarán pequeñas fisuras por el secado rápido debido

a las temperaturas elevadas proceder a preparar una mezcla de barro más fluido y con ayuda de una brocha continuar a colocar por las partes donde se presenten; y seguir con la instalación de puertas y ventanas donde corresponda.

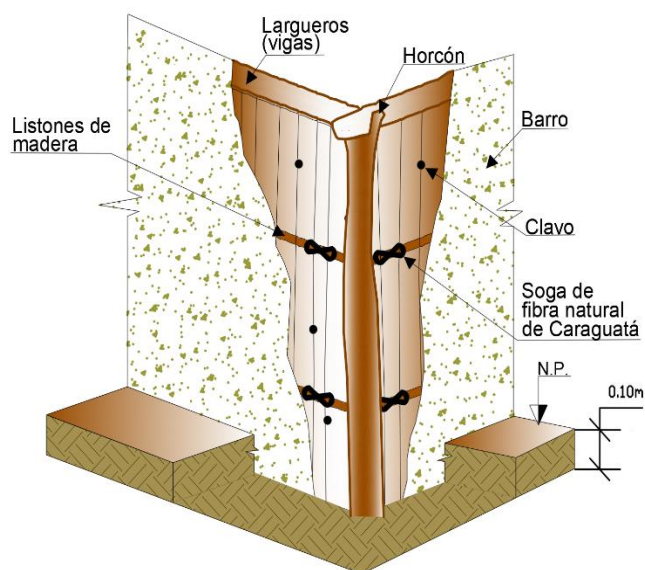


Figura 7. Colocado de barro sobre maderas

En la cubierta se ejecuta la técnica de la torta de barro para lo cual:

- preparar la madera y el barro como en la técnica anterior;
- conformar la estructura de la cubierta, para lo cual sobre las vigas de término de las paredes, se debe colocar otra a una altura de 1.20 metros según el lado de caída de la pendiente, la cual debe ser sujeta por clavo o tejido de fibra natural de calaguata en los horcones o en su defecto en maderas adicionales a los horcones que permitan lograr la altura para el alcance necesario de la pendiente requerida, la cual debe ser mayor o igual a 20 por ciento a manera de lograr una evacuación rápida de las aguas. Sobre las vigas que dan la pendiente a la cubierta en forma transversal colocar los largueros espaciados de 30 a 50 centímetros como se indica en la Figura 8; y proceder a conformar la torta de barro, para lo cual por encima de las vigas horizontales, por encima de las paredes se debe colocar varillas o ramas de árboles previamente tratadas de forma continua, a manera de no dejar espacios vacíos entre ellos. Por encima de las varillas colocar plástico de espesor mínimo de dos milímetros para evitar cualquier filtración sujeta por clavos sobre las varillas; colocar dos capas de barro (barro preparado), de espesor de dos centímetros cada una, con intervalo de 24 horas; colocar mallas milimétricas metálicas, entre la diferencia de altura de vigas en todo el perímetro, de manera de evitar el ingreso de insectos. La sujeción de la malla debe realizarse con clavos en las maderas; y encima de los largueros, para la conformación de la cubierta debe colocarse el aislante de propietileno conjuntamente con la calamina de zinc. Estos elementos deben ser sujetos por pernos en los largueros como se indica en la Figura 9.

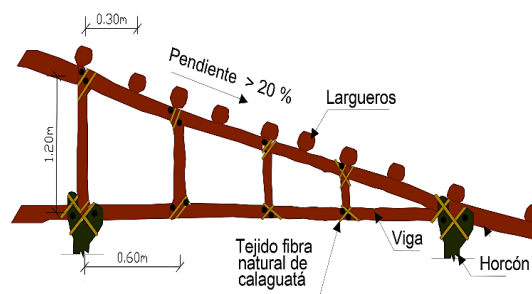


Figura 8. Conformación estructura de la cubierta

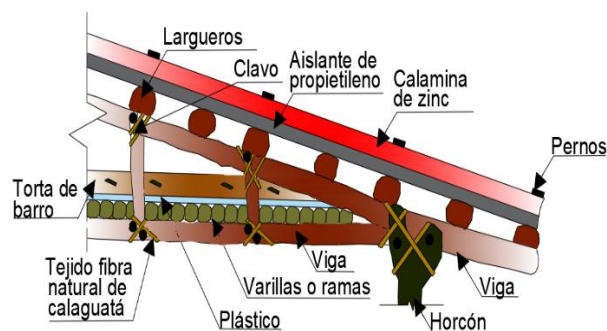


Figura 9. Conformación de la cubierta

En el piso se emplea la técnica del piso apisonado para lo cual:

- se debe estabilizar el piso, de manera que se tiene que excavar de cinco a diez centímetros en todos los ambientes de la vivienda; y
- compactar la superficie con un objeto pesado o un pisón; preparar la tierra estabilizada con cemento bajo las siguientes proporciones: una medida de cemento, ocho medidas de tierra tamizada (de la extraída) y media medida de agua; y proceder a colocar la tierra estabilizada en una capa e ir compactándola como se indica la Figura 10.

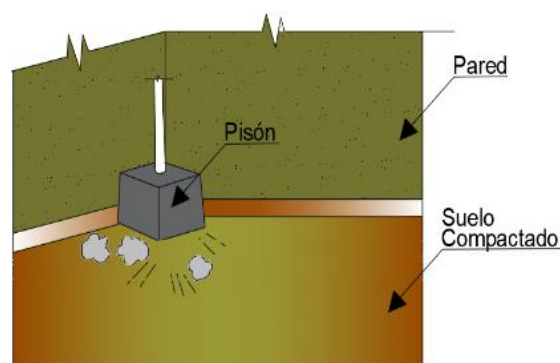


Figura 10. Compactación del piso

4. CONCLUSIONES

Al interior de la resiliencia como componente fundamental en la disminución de la vulnerabilidad, se pudo explicar sus funciones como derivación de un análisis teórico alrededor del tema mediante el análisis conceptual desarrollado por 39 autores vinculados con investigaciones a las viviendas tradicionales, al cambio climático (eventos

hidrometeorológicos) y a los riesgos. Se dedujo que la resiliencia tiene como cualidad la capacidad de adaptación como una propiedad intrínseca en términos de interdependencias que los sistemas, recursos, materiales u objetos deben tener como su principal fortaleza, asumida en esta investigación. La adaptación planificada debe ser un instrumento del ordenamiento territorial y ambiental, a fin de reducir riesgos, minimizar la vulnerabilidad y alcanzar un desarrollo equilibrado. Esta perspectiva de la capacidad de adaptación planificada de la resiliencia ha sido el *leitmotiv* utilizado para concebir la mejora de las construcciones tradicionales de los pueblos originarios frente a los eventos hidrometeorológicos.

De esta manera, se concluyó que la resiliencia de los sistemas socio naturales frente al cambio climático es una capacidad de adaptación planificada que puede ayudar a contrarrestar y (o) afrontar los efectos de la variabilidad del clima puesto que intrínsecamente se muestra como coadyuvante a la mejora de la estabilidad de la condición humana en regiones que son amenazadas por determinados fenómenos naturales extremos de origen climático (eventos hidrometeorológicos) como es el caso que se presenta en la provincia del Gran Chaco, Bolivia. Los aportes teóricos y empíricos propiciaron el desarrollo de una triangulación de la información colectada para verificar la pertinencia y consenso de las variables identificadas. Como resultados, se obtuvieron cuatro variables con sus respectivos parámetros de estudio:

- Localización de la vivienda, que considera elementos de ordenamiento territorial a través de políticas de uso de suelo, amparada por los parámetros: ubicación, área de vivienda, topografía y suelo.
- Diseño de vivienda, que establece los requerimientos generales y particulares de del espacio habitacional, y considera el modelo de la vivienda, su orientación, la ventilación, la distribución de los espacios dentro de la misma y los materiales como parámetros a tener en cuenta.
- Materiales de construcción para la vivienda que involucra las materias primas empleadas en las edificaciones, ya sean naturales y artificiales en una combinación de ambos tipos de materiales, que involucra parámetros para la selección de los materiales, de acuerdo con las propiedades físico, mecánicas y químicas a la hora de realizar los cimientos, paredes, cubiertas, y pisos en función de los espacios que se definen la vivienda por sus habitantes.
- Técnicas de construcción de la vivienda, que representan el conjunto de procedimientos o recursos en el proceso de construcción, y emplea parámetros que se relacionan con la forma de preparar, dosificar, aplicar y mezclar los materiales dentro de las técnicas tradicionales en el momento de ejecutar los cimientos, paredes, cubiertas, y pisos, en el logro y obtención de mayor rigidez, consistencia y durabilidad de los elementos componentes de la vivienda ante los eventos extremos hidrometeorológicos presentes en la región.

Estas variables son resultado de las aportaciones culturales del pueblo originario Weenhayek en la cual, se destacan el mantenimiento de la localización de sus viviendas próximas a los ríos, salvaguardando su relación con la pesca, la conservación de los espacios que conforman la vivienda, resguardando sus usos (patio, espacios semi abiertos), la preservación de materiales y métodos constructivos tradicionales tales como barro, horcones, fibra natural de Caraguatá, entre otros, lo que asegura su identidad cultural constructiva.

REFERENCIAS

- Aguilar, L. (2020). *Estudio de la contribución del diseño industrial en la transformación de Quito en una ciudad resiliente al cambio climático* [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Central del Ecuador.
- Altieri, M., Nicholls, C., Henao, A., & Lana, M. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Revista Magazine INRA and Springer*, 35, 869-890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Ávila, B., & Gonzáles, G. (2015). Sociedades resilientes: criterios para estrategias educativas encaminadas a la reducción de riesgo de desastres. *Revista Interamericana de Educación de Adultos*, 37(2), 26-46.
- Bahadur, A., Ibrahim, M., & Tanner, T. (2010). *The resilience renaissance? Unpacking of resilience for tackling climate change and disasters*. https://www.researchgate.net/publication/275831843_The_Resilience_Renaissance_Unpacking_of_Resilience_for_Tackling_Climate_Change_and_Disasters_Brighton_IDS_SCR_Working_Paper. (Junio, 2022).
- Bárcena, A., Samaniego, J., Galindo, L., Ferrer, J., Alatorre, J., Stockins, P., Reyes, O., Sánchez, L. y Mostacedo, J. (2019). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Una visión gráfica*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42228/4/S1701215A_es.pdf. (Junio, 2022).
- Baró, J. y Monroy, F. (2018). *Enfrentando los riesgos siconaturales*. <http://www.educacionchiapas.gob.mx/pcivil/2019/material/Enfrentando%20los%20riesgos%20siconaturales.pdf>. (Junio, 2022).
- Barton, J. (2009). Adaptación al cambio climático en la planificación de ciudades-regiones. *Revista de Geografía Norte Grande*, 43, 5-30. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-4022009000200001>
- Borgatti, S., Everett, M., & Freeman, L. (2002). UCINET for Windows: Software for social network analysis. https://www.researchgate.net/publication/21663666_UCINET_for_Windows_Software_for_social_network_analysis. (Junio, 2022).
- Camarero, L., & Del Pino, J. (2014). Cambios en las estructuras de los hogares rurales. *Revista Internacional de Sociología*, 72(2), 377-401. <https://doi.org/10.3989/ris.2012.12.27>

- Castro, L. Miranda, A. y Gómez, M. (2014). *IDEAL 2014. Infraestructura en el Desarrollo Integral de América Latina*.
https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/748/2014_asp_cambio_climatico.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chacón, J. (2008). *Los conceptos actuales de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, en la prevención de movimientos de ladera, con ejemplos de aplicaciones prácticas*.
https://www.researchgate.net/publication/258856593_Los_conceptos_actuales_de_susceptibilidad_peligrosidad_y_riesgo_en_la_prevencion_de_movimientos_de_ladera_con_ejemplos_de_aplicaciones_practicas. (Junio, 2022).
- Clerc, J. y Díaz, M. (2016). *Un marco para estimar los costos incrementales del cambio climático en infraestructura*.
<https://publications.iadb.org/es/publicacion/15541/un-marco-para-estimar-los-costos-incrementales-del-cambio-climatico-en>. (Junio, 2022).
- Consejo de Europa (CE), (1983). *Carta europea de ordenación del territorio. Unión Europea*.
http://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2013/474/6059/1/Documento37.pdf. (Junio, 2022).
- Del cura, F. y Quintero, E. (2016). *A4 - 98 Aproximaciones a la medición de la resiliencia en comunidades rurales del Estado Mérida, Venezuela, ante escenarios de cambio climático*.
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/58395/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (Junio, 2022).
- Doring, T., Vieweger, A., Putasso, M., Vaarst, M., Finckh, M., & Wolfe, M. (2013). Resilience as a universal criterion of health. *Magazine J Sci Food Agric*. (95), 455-465. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6539>
- Estado Plurinacional de Bolivia (2014, 9 de enero). *Ley N° 482, de 9 de enero de 2014, ley de Gobiernos Autónomos Municipales*. *Gaceta oficial Estado Plurinacional de Bolivia*.
<http://www.gacetaoficialdebolivia.gob.bo/>. (Junio, 2022).
- Fischelli, N., Schuurman, G., & Hoffman, C. (2016). Is 'Resilience' Maladaptive? Towards an Accurate Lexicon for Climate Change Adaptation. *Magazine Environmental Management*, 57, 753-758. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0650-6>
- Fundación Proyungas. (2018). *Gran Chaco Sudamericano para todos y para siempre, agenda «Chaco 2030»*.
<http://proyungas.org.ar/gran-chaco-sudamericano-para-todos-y-para-siempre-agenda-chaco-2030/>
- García, I. (2017). *Estudio de permeabilidad en el adobe implementando agregados naturales* [Tesis de grado no publicada]. Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- González, E., Benavides, L., Maldonado, A., Cruz, G., & Méndez, L. (2019). Nuevos desafíos para la educación ambiental: la vulnerabilidad y la resiliencia social ante el cambio climático. *Revista Cuadernos de Investigación UNED*, 11(1), S71-S77.
- González, E., & Maldonado, A. (2017). Amenazas y riesgos climáticos en poblaciones vulnerables. El papel de la educación en la resiliencia comunitaria. *Revista Teor. Educ.*, 29(1), 273-294.
<https://doi.org/10.14201/teoredu291273294>
- Grupo de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2009. *Integrando la reducción del riesgo de desastres en la CCA y el Manud. Organización de las Naciones Unidas*.
https://www.unisdr.org/files/10760_undgdrguidancenotespanish28lowreso.pdf. (Junio, 2022).
- Guarino, G., & Pirono, A. (2019). Patrimonio biocultural y resiliencia en los pueblos indígenas del Chaco, Argentina. *Revista Inventio*, 15(35), 33-43.
- Hábitat para la humanidad Argentina – SAMSUNG ([HHA-S], 2016). *Hacia soluciones habitacionales en el Gran Chaco*.
https://issuu.com/hphargentina/docs/diagnostico_gran_chaco_hpha2015. (Junio, 2022).
- Hardy, V., Cuevas, A., & Gallardo, O. (2019). Aprendizaje y resiliencia en la gestión local de riesgos de desastres. *Revista Luz*, 18(2), 42-52.
- Holling, S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Magazine Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf. (Junio, 2022).
- Jiménez, M. (2013). *¿Resiliencia ante el cambio climático?*
<http://www.ccpv.gob.mx/ecologia-humana/documentos/Resiliencia-ante-el-cambio-climatico.pdf>. (Junio, 2022).
- Kenneth, A., Marshall, P., Abdulla, A., Beeden, R., Bergh, C., Ryan, B., Eaking, C., Game, E., Gooch, M., Graham, N., Green, A., Hoodonk, R., Knowland, C., Mangubhai, S., Marshall, N., Maynard, J., MacGinnity, P., McLeod, E., Mumby, P., Nystrom, M., Obura, D., Jamie, O., Possingham, H., Pressey, R., Rowlands, G., Tamelander, J., Wachenfeld, D., & Wear, S. (2015). Operationalizing resilience for adaptive coral reef management under global environmental change. *Revista Global Change Biology*, 21(1), 48-61. <https://doi.org/doi:10.1111/gcb.12700>
- Lara, R. y Vides-Almonacid, R. (Eds). (2014). *Sabiduría y Adaptación: El Valor del Conocimiento Tradicional en la Adaptación al Cambio Climático en América del Sur*. UICN.
- Leichenko, R. (2011). *Climate Change and Urban Resilience*.
https://www.researchgate.net/publication/235981318_Climate_Change_and_Urban_Resilience. (Junio, 2022).
- Levine, N., Zhang, K., Longo, M., Baccini, A., Phillips, O., Lewis, S., Alvarez, E., Segalin, A., Brienen, R., Erwin, T., Feldpausch, T., Monteagudo, A., Nuñez, P., Prieto,

- A., Silva, J., Malhi, Y., & Moorcroft, P. (2016). Ecosystem heterogeneity determines the ecological resilience of the Amazon to climate change. *Revista PNAS*, 113(3), 793-797. <https://doi.org/10.1073/pnas.1511344112>
- Magrin, G. (2015). *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39842-adaptacion-al-cambio-climatico-america-latina-caribe>. (Junio, 2022).
- Medina, D. (2016). *Evaluación de la sostenibilidad de materiales de construcción en la edificación de viviendas en el distrito de Huacho – 2016* [Tesis de grado no publicada]. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
- Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda. (2020). *Manual de Construcciones de Viviendas Sociales*. [https://www.oopp.gob.bo/wp-content/uploads/2020/antiguos/2a804ae20fc329b4f1f1a0b896d85d68MANUAL_MCVS_2020_FINAL_30.10.2020_impresion_w_\(1\).pdf](https://www.oopp.gob.bo/wp-content/uploads/2020/antiguos/2a804ae20fc329b4f1f1a0b896d85d68MANUAL_MCVS_2020_FINAL_30.10.2020_impresion_w_(1).pdf). (Junio, 2022).
- Ochoa, M., Castellanos, R., Ochoa, Z., & Oliveros, J. (2015). Variabilidad y cambio climáticos: su repercusión en la salud. *Revista Medisan*, 19(7), 873.
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. (2009). *Terminología sobre la reducción del riesgo de desastre*. Organización de las Naciones Unidas. http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminology_Spanish.pdf. (Junio, 2022).
- Organización de las Naciones Unidas (2015). *Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39781-medidas-adaptacion-mitigacion-frente-al-cambio-climatico-america-latina-caribe>. (Junio, 2022).
- Papa, R., Galderisi, A., Vigo, M., & Saretta, E. (2015). Cities, energy and climate change. *Magazine Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 8(1), 19-49.
- Peredo, S., & Vela, M. (2016). Determinación de los niveles de resiliencia/vulnerabilidad en iniciativas de agroecología urbana en el suroeste Andalúz. *Revista IDESA*, 34(2), 5-13. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016005000003>
- Pickett, S., Mcgrath, B., Cadenasso, M. y Felson, A. (2014). *Ecological resilience and resilient cities*. https://www.researchgate.net/publication/263145263_Ecological_resilience_and_resilient_cities. (Junio, 2022).
- Pradilla, G. (2016). *Análisis ambiental de las prácticas campesinas de resiliencia a la variabilidad y el cambio climático en fincas ecológicas del altiplano Cundiboyacense* [Tesis de magister no publicada]. Universidad Nacional de Colombia.
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo ([PNUD], 2011). *Tras las huellas del cambio climático en Bolivia*. Organización de las Naciones Unidas. <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/59246/59401.pdf?sequence=1>. (Junio, 2022).
- Quevedo, A. (2017). Nuevas formas de enseñanza en gestión ambiental para la reducción de la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en Bolivia. *Revista CIEG*, 28, 213-225.
- Quinlan, A., Berbés, M., Jamila, L., & Peterson, G. (2016). Measuring and assessing resilience: broadening understanding through multiple disciplinary perspectives. *Magazine Journal of Applied Ecology*, 53, 677-687. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12550>
- Rebotier, J., López, J., & Pigeon, P. (2013). Las paradojas de la resiliencia: miradas cruzadas entre Colombia y Francia. *Revista Territorios*, 28(2013), 127-145.
- Rivero, E. (2017). Actitudes resilientes ante el cambio climático en Achocalla. *Revista Desafíos Educativos*, (17), 83-103.
- Rodríguez, Y. (2018). Potenciar la resiliencia de las ciudades y sus territorios de pertenencia en el marco de los acuerdos sobre cambio climático y de la Nueva Agenda Urbana. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44218/S1800995_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (Junio, 2022).
- Sánchez, P., Gallardo, R., & Ceña-Delgado, F. (2016). La noción de resiliencia en el análisis de las dinámicas territoriales rurales: Una aproximación al concepto mediante un enfoque territorial. *Revista Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13(77), 93-116. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr13-77.nrad>
- Sandoval, J. (2020). Vulnerabilidad-resiliencia ante el proceso de riesgo-desastre: Un análisis desde la ecología política. *Revista Polis*, 19(56). <http://dx.doi.org/10.32735/s0718-6568/2020-n56-1527>
- Sepúlveda, J. (2015). *Acciones de adaptación y mitigación al cambio climático en la planificación de la ciudad de Medellín* [Tesis de magister no publicada]. Universidad Nacional de Colombia.
- Shaikh, K., & Saidul, M. (2016). Community Capitals as Community Resilience to Climate Change: Conceptual Connections. *Revista nt J Environ Res Public Health*, 13(12), 1211. <https://doi.org/10.3390/ijerph13121211>
- Skerk, C., Mejía, A., Katz, R., García, R., Givogri, P., Lleras, G. y Hohon, J. (2014). *La infraestructura en el desarrollo de América Latina. Tendencias y novedades de la infraestructura en la región*. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/750>. (Junio, 2022).
- Timpane, B., Beechie, T., & Klinger, T. (2017). A systematic review of ecological attributes that confer resilience to climate change in environmental restoration. *PLoS ONE*, 12(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173812>
- UN-Habitat (2016). *Resiliencia Urbana*. <https://es.unhabitat.org/resiliencia/>. (Junio, 2022).
- Uriarte, J. (2010). La resiliencia comunitaria en situaciones catastróficas y de emergencia. *Revista INFAD*, 1(1), 687-693.
- Vides-Almonacid, R. (2014). *El Valor del Conocimiento Tradicional para la Adaptación al Cambio Climático*

en América del Sur.
<https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2014-001.pdf>. (Junio, 2022).

Zúñiga, I. (2012). *Metodología: Gestión ambiental urbana de recursos construidos de valor patrimonial- Aplicación en Gibara*, Holguín [Tesis de doctorado no publicada]. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de Cuba.

Zúñiga, I. (2017). Nociones sobre resiliencia urbana y territorial. *Revista del Ordenamiento Territorial y el Urbanismo*, 24, 43-48.

BIOGRAFÍA



Juan Rojas, Ingeniero Civil. Consultor externo en Construcciones Civiles y proyectos de Pre-Inversión. Cursante de Máster in Construction Project Management, University of the West of England, Bristol, U.K. Doctor en Proyectos y Maestría en Diseño, Gestión y Elaboración de Proyectos, Universidad

Internacional Iberoamericana, Chiapas, México. Máster en Diseño, Gestión y Elaboración de Proyectos, Universidad Europea del Atlántico, Santander, España. Especialista en ISO 45001, Universidad Europea del Atlántico. Especialista en ISO 9001, Universidad Europea del Atlántico. Diplomado en Administración de Obras Para La Construcción, Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, Bolivia. Tiene publicaciones en revistas indexadas.



Libys Zúñiga, Arquitecta. Profesora Titular de la carrera de Ingeniería Civil. Departamento de Construcciones. Facultad de Ingeniería. Universidad de Holguín. Máster en Gestión de los Asentamientos Humanos, Universidad Tecnológica de La Habana. Doctora en Ciencias Técnicas, Instituto Superior de

Ciencias y Tecnologías Aplicadas, Universidad de La Habana. Especialista en gestión ambiental urbana, patrimonio construido, desarrollo local; gerencia proyectos nacional e internacional para el ordenamiento territorial y urbano: Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) y el Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas (PNUMA). Tiene numerosos artículos publicados en revistas indexadas, premios nacionales e internacionales por su desempeño profesional.

MTest: a Bootstrap Test for Multicollinearity

Morales-Oñate, Víctor ^{1,2,*}  ; Morales Oñate, Bolívar ³ 

¹Universidad de las Américas, Departamento de Economía, Quito, Ecuador

²Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Administración y Economía, Quito, Ecuador

³Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, Ambato, Ecuador

Abstract: A nonparametric test based on bootstrap for detecting multicollinearity is proposed: MTest. This test gives statistical support to two of the most famous methods for detecting multicollinearity in applied work: Klein's rule and Variance Inflation Factor (VIF for essential multicollinearity). As part of the procedure, MTest generates a bootstrap distribution for the coefficient of determination which: i) lets the researcher assess multicollinearity by setting a statistical significance α , or more precisely, an achieved significance level (ASL) for a given threshold, ii) using a pairwise Kolmogorov-Smirnov (KS) test, establishes a guide for an educated removal of variables that are causing multicollinearity. In order to show the benefits of MTest, the procedure is computationally implemented in a function for linear regression models. This function is tested in numerical experiments that match the expected results. Finally, this paper makes an application of MTest to real data known to have multicollinearity problems and successfully detects multicollinearity with a given ASL.

Keywords: MTest, Multicollinearity, NonParametric Statistics, Simulation

MTest: una Prueba *bootstrap* para Multicolinealidad

Resumen: Se propone una prueba no paramétrica basada en bootstrap para detectar multicolinealidad: MTest. Esta prueba brinda soporte estadístico a dos de los métodos más famosos para detectar multicolinealidad en trabajo aplicado: la regla de Klein y el Factor de Inflación de Varianza (VIF por multicolinealidad esencial). Como parte del procedimiento, MTest genera una distribución bootstrap para el coeficiente de determinación que: i) permite al investigador evaluar la multicolinealidad al establecer una significancia estadística α , o más precisamente, un nivel de significancia alcanzado (ASL) para un umbral dado, ii) utilizando una prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) por parejas, establece una guía para una eliminación informada de las variables que están causando multicolinealidad. Para mostrar los beneficios de MTest, el procedimiento se implementa computacionalmente en una función para modelos de regresión lineal. Esta función se prueba en experimentos numéricos que coinciden con los resultados esperados. Finalmente, este documento hace una aplicación de MTest a datos reales que se sabe que tienen problemas de multicolinealidad y detecta con éxito la multicolinealidad con un ASL dado.

Palabras clave: MTest, Multicolinealidad, Estadística no paramétrica, Simulación

1. INTRODUCTION

When predictors of a regression model are correlated, multicollinearity appears. This may be a problem depending on the *degree* of correlation in the dataset which may be stated using the determinant of the predictors. If the predictors are linearly dependent, the determinant of the correlation matrix is equal to 0 (perfect multicollinearity); if the determinant is equal to 1, there is no multicollinearity (Stein, 1975).

Testing for multicollinearity has been studied from parametric approaches and *rule of thumb* proposals. Farrar and Glauber (1967) is a seminal work in the first case. They propose three different ways to do the test.

In the first one, if the determinant of the correlation of the matrix of the predictors is *almost* equal to 1, then there is no mul-

ticollinearity. It relies on having observations that come from an orthogonal, multivariate-normal distribution. This excludes the case when dummy variables are included. The second test they propose starts by computing the principal minors of the correlation matrix of the predictors. Each minor is divided by the determinant of the correlation of the matrix, this quotient has an F-distribution if the underlying distributions are normal. In the third case, they use the partial correlation coefficients, r_{ij} of the determinant of the correlation of the matrix of the predictors. r_{ij} are compared to their off-diagonal elements and use a t-test to make a comparison. The first and second proposals in Farrar and Glauber (1967) share the fact that the underlying distributions are normal or multivariate-normal. This may be a limitation in real life applications where dummy variables, skewness and asymmetry are present in data. Then, a nonparametric approach can be useful to over-

victor.morales@uv.cl

Recibido: 21/12/2021

Aceptado: 20/01/2023

Publicado en línea: 01/05/2023

10.33333/rp.vol51n2.05

CC BY 4.0

come this issue.

Some authors claim that the *problem of multicollinearity* should not be an issue (Leamer, 1983; Achen, 1982). They emphasize that even in the presence of multicollinearity, estimators keep being best linear unbiased estimator (BLUE) which is actually the case. So they say that the *real* problem is a matter of sample size. They claim that if the sample size is large enough, then multicollinearity would not be a problem. Sample size is sometimes restricted to the field of study. In economics, for example, time series of some indicators are not long enough and statistical modeling may be challenging. Nonetheless, this is changing with the availability of open source projects to access to economic data such as the World Development Indicators (The World Bank, 2021). Around the time authors like Leamer (1983) and Achen (1982) stated their concerns, the scientific community lacked of more data or computing power, so their claim needed careful attention. But things have change in regards to computing power and data.

With the emerging of the Big Data era, sample size is becoming less of an issue, but the problem of multicollinearity remains (Dinov, 2016). The problem is that the presence of multicollinearity makes the estimated variances and covariances inflated. In this context, wider confidence intervals are obtained which makes it easier not to reject the null hypothesis of the coefficients in the predictors. It follows that there may be one or more coefficients with no statistical significance but with a high coefficient of determination (Gujarati et al., 2012).

Jaya et al. (2020) make a comparison of different machine learning techniques in regression such as Ridge and Lasso to obtain the technique that avoids multicollinearity. In order to detect multicollinearity however, they use Variance Inflation Factors (VIF), which can be seen as a *rule of thumb* approach.

In R there are several packages that try to detect multicollinearity: Imdadullah et al. (2016) and Salmerón-Gómez et al. (2021b) are two of the most recent ones. Salmerón-Gómez et al. (2021b) propose a detection method based on a perturbation of the observations but they do not perturb dummy variables. Imdadullah et al. (2016) make a review of these methods and create an R package to make overall (determinant, R-squared, among others) and individual (Klein's rule, VIF, among others) multicollinearity diagnosis. Klein's rule and VIF can be derived from a global and auxiliary coefficients of determination of a regressions model and a *rule of thumb* is applied. In this sense, both methods consider the coefficients of determination fixed when it can actually be considered a random variable (Carrodus and Giles, 1992; Koerts and Abrahamse, 1969). If by bootstrapping we let the global and auxiliary coefficients of determination be random variables, the detection of multicollinearity goes one step further. This work takes the two of the most widely used individual *rule of thumb* methods, Klein's rule and VIF, and places them in a bootstrap context in order to have a statistical test to assess multicollinearity. This proposal makes it possible to have a null hypothesis and an alternative hypothesis for the presence of multicollinearity, and depending on the significance level, the researcher could reach a conclusion.

This paper is organized as follows. In Section 2, we detail the VIF, Klein's rule, their relationship and recall the bootstrap concept. Section 3 states the null and alternative hypothesis of the proposed MTest with it corresponding procedure. In Section 4, we set up a simulation study to analyze MTest under a controlled situation.

In Section 5, we apply MTest to a widely used dataset known to have multicollinearity issues. Finally, in Section 6 we give some conclusions.

2. NOTATION AND CONCEPTS

2.1 General Setup

Consider the regression model

$$Y_i = \beta_0 X_{0i} + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_p X_{pi} + u_i \quad (1)$$

where $i = 1, \dots, n$, $X_{j,i}$ are the predictors with $j = 1, \dots, p$, $X_0 = 1$ for all i and u_i is the gaussian error term.

In order to describe Klein's rule and VIF methods, we need to define *auxiliary regressions* associated to model (1). An example of an auxiliary regressions is:

$$X_{2i} = \gamma_1 X_{1i} + \gamma_3 X_{3i} + \dots + \gamma_p X_{pi} + u_i.$$

In general, there are p auxiliary regressions and the dependent variable is omitted in each auxiliary regression. Let R_g^2 be the coefficient of determination of (1) and R_j^2 the j th coefficient of determination of the j th auxiliary regression.

2.2 VIF

A common way practitioners compute the VIF method is by:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (2)$$

for every auxiliary regression $j = 1, \dots, p$. It states that multicollinearity is generated by covariate X_j if $VIF_j > 10^1$ (Gujarati et al., 2012). The case $j = 0$ is not considered since (2) detects approximate multicollinearity of the essential type. This means that the intercept is excluded. For more details and methods on detecting essential and non-essential multicollinearity, see Salmerón-Gómez et al. (2020).

2.3 Klein's rule

Klein's rule compares the R_j^2 coefficient of determination of the j th auxiliary regression with R_g^2 . The rule states that if $R_j^2 > R_g^2$ then the X_j variable originates multicollinearity.

Klein stated that *Intercorrelation ... is not necessarily a problem unless it is high relative to the over-all degree of multiple correlation ...* (Klein, 1962). It means that there is an implicit threshold (R_g^2) and Klein's rule should be used along with VIF as they may be complementary since there will be cases when VIF report a multicollinearity problem, but Klein's rule does not.

2.4 Relationship between the VIF and Klein's rule

It is possible to link both methods by the expression

$$10 = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

¹ Some literature also uses 3 or 5 as a threshold.

$$R_j^2 = 0.90$$

which means that according to the VIF method, variable X_j originates multicollinearity if $R_j^2 \geq 0.90$.

Different contradictions that may exist between the Klein's rule and the VIF. For example, if $R_g^2 = 0.85$ and some $R_j^2 = 0.88$, Klein's method would detect multicollinearity but VIF will not. As another example, if $R_j^2 = 0.94$ and $R_g^2 = 0.98$, VIF will detect multicollinearity but Klein will not.

It should be noted that the value 0.90 is not fixed in all applications. For example, works like Marcoulides and Raykov (2019) tests several values as a VIF threshold. Our proposal, MTest has 0.90 threshold by default but can be changed if the researcher decides another one.

2.5 Bootstrap

The bootstrap resampling technique was introduced by Efron (1992), in his seminal work *Bootstrap methods: Another look at the jackknife*. It is a computationally intensive method, without strict structural assumptions in the underlying random process that generates the data. It is used to obtain approximations of the distribution of an estimator, of the bias, the variance, standard error and confidence intervals. In a normal experiment, repeating the experiment enables us to compute standard errors, the bootstrap principle lets us *simulate* the replication by resampling.

If the resampling mechanism is chosen appropriately, then the resampling, together with the sample in question, is expected to reflect the original relationship between the population and the sample. The advantage is that we can now avoid the problem of having to deal with the population, and instead we can use the sample and resamples, to address statistical inference questions regarding the unknown quantities in the population. The bootstrap principle addresses the problem of not having complete knowledge of the population, to make an inference about the estimator $\hat{\theta}$, schematically:

- The first step consists of the construction of an estimator of an unknown probability distribution F , $F(\hat{F})$ from the available observations $X_1, \dots, X_n$, which provides a representative image of the population².
- The next step consists of the generation of random variables $X_1^*, \dots, X_n^*$ of the estimator $\hat{F}$, which fulfills the role of the sample for the bootstrap version of the original problem.

Therefore, the bootstrap version of the estimator $\hat{\theta}$ based on the original sample $X_1, \dots, X_n$ is given by $\hat{\theta}^*$, obtained by substituting $X_1^*, \dots, X_n^*$.

The above setup is known as the *nonparametric* bootstrap, but it also has a *parametric* approach where one can assume F belonging to a parametric model $\{F_\theta : \theta \in \Theta\}$ where Θ is the parameter space. In this case, $F = F_\theta$ where $\hat{\theta}$ is an estimator of θ . For more details on parametric and nonparametric bootstrap, see Godfrey (2009).

It must be noted that the bootstrap also has some drawbacks. Horowitz (2001) highlights two important problems. The first one is

²Let X be a random variable, F the cumulative distribution function and $\hat{F}$ is a non parametric functional estimator of F .

instrumental variables estimation with ill correlated instruments and predictors. In this case, bootstrap approximations fail to be useful. The second problem is when the variance of the bootstrap estimator is high. This work does not fit in either of these cases since it is not related to instrumental variables and the variance of the bootstrap estimator is finite and well behaved.

3. MTEST

Given a regression model, Mtest is based on computing estimates of R_g^2 and R_j^2 from n_{boot} bootstrap samples obtained from the dataset, R_{gboot}^2 and R_{jboot}^2 respectively.

Therefore, in the context of MTest, the VIF rule translates into:

$$H_0 : \mu_{R_{jboot}^2} \geq 0.90,$$

and

$$H_a : \mu_{R_{jboot}^2} < 0.90.$$

We seek an achieved significance level (ASL)

$$ASL = \text{Prob}_{H_0} \{ \mu_{R_{jboot}^2} \geq 0.90 \}$$

estimated by

$$\widehat{ASL}_{n_{boot}} = \# \{ \mu_{R_{jboot}^2} \geq 0.90 \} / n_{boot}$$

In a similar manner, the Klein's rule translates into:

$$H_0 : \mu_{R_{jboot}^2} \geq \mu_{R_{gboot}^2},$$

and

$$H_a : \mu_{R_{jboot}^2} < \mu_{R_{gboot}^2}.$$

We seek an achieved significance level

$$ASL = \text{Prob}_{H_0} \{ \mu_{R_{jboot}^2} \geq \mu_{R_{gboot}^2} \}$$

estimated by

$$\widehat{ASL}_{n_{boot}} = \# \{ \mu_{R_{jboot}^2} \geq \mu_{R_{gboot}^2} \} / n_{boot}.$$

It should be noted that this set up lets us formulate VIF and Klein's rules in terms of statistical hypothesis testing.

3.1 MTest: the algorithm

R_{gboot}^2 and R_{jboot}^2 are the distributions of R_g^2 and R_j^2 induced by applying the bootstrap procedure to the dataset. Achieved significance level is computed for the VIF and Klein's rule. In the following we describe the procedure step by step:

1. Create n_{boot} samples from original data with replacement of a given size (n_{sam}).
2. Compute R_{gboot}^2 and R_{jboot}^2 from each n_{boot} samples. This outputs a $B_{n_{boot} \times (p+1)}$ matrix.
3. Compute $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$ for the VIF and Klein's rule.

Note that the matrix $B_{n_{boot} \times (p+1)}$ allows us to inspect results in detail and make further tests such as boxplots, pairwise Kolmogorov-Smirnov (KS) of the predictors and so on.

4. NUMERICAL EXPERIMENTS

4.1 Experiment 1

4.1.1 Data simulation

In this section, we implement the procedure described in Section 3.1 that allows us to test the hypothesis. We start by simulating 1000 data points according to the following regression:

$$Y_i = 10 - 5X_{1i} + 3X_{2i} + 9X_{3i} + \hat{\epsilon}_i$$

where $\hat{\epsilon} \sim N(0, 3)$. X_1 , X_2 and X_3 are simulated using MASS R package (Venables and Ripley, 2002) with the following correlation structure:

$$\begin{pmatrix} 1.00 & -0.945 & 0.3 \\ -0.945 & 1.00 & -0.5 \\ 0.30 & -0.50 & 1.0 \end{pmatrix}.$$

From this correlation structure it is expected that X_{1i} and X_{2i} may cause multicollinearity due to the high correlation between them (-0.945).

The code for the data generation process is detailed in Appendix A. The code for MTest is detailed in Appendix B. The function is defined with four parameters:

- **datos**: A $p + 2$ dimensional data frame that includes the dependent variable.
- **nboot**: Number of bootstrap replicates. This is the n_{boot} parameter described in Section 3.1, the default $n_{boot} = 500$.
- **nsam**: Sample size in the bootstrap procedure. When $nsam = \text{NULL}$ (default), then $nsam = \text{nrow}(\text{datos}) * 3$.
- **trace**: Logical. If TRUE then the iteration number out of a total of n_{boot} is printed. The default value is FALSE.
- **seed**: A numeric value that sets the seed value of the procedure. The default value is NULL.
- **valor_vif**: A numeric value that sets threshold for in the VIF rule. The default value is $\text{valor_vif} = 0.9$.

4.1.2 Testing multicollinearity

Table 1 shows the R^2 for the global regression and auxiliary regressions in the first row, VIF values are presented in the second row and Klein's rule can be computed with this information which is shown in the third row. The fourth and fifth row of Table 1 present the MTest results by computing $\widehat{ASL}_{n_{boot}=1000}$ for VIF and Klein's rules.

From a traditional usage of the rules, the Klein's rule suggests that X_2 is a variable that causes multicollinearity since its auxiliary regression $R_{X_2}^2$ is greater than the global R_g^2 . Klein's rule is presented with * denoting the variables that the rule identifies as a problem and with • the variables that do not.

In the VIF case, if the threshold is equal to 10, this method suggests that X_1 and X_2 causes multicollinearity. Both rules detect multicollinearity problems as expected.

MTest is also presented in Table 1 with ASL values computed with $n_{boot} = 1000$, $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$ for VIF and Klein are 1 for predictors X_1, X_2 and 0 for X_3 . This implies that we cannot reject the null hypothesis stated in 3.1. In other words, this means that X_1 and X_2 also yield multicollinearity problems according to MTest which confirms the results in the application of traditional VIF and Klein's rules.

Table 1. R^2 for the global regression and auxiliary regressions are presented in the first row. VIF values are presented in the second row and Kleins's rule is presented with * denoting the variables that the rule identifies as a problem and with • the variables that do not.

	Y	X ₁	X ₂	X ₃
R^2	0.9073	0.9308	0.9432	0.5273
VIF		14.4583	17.606315	2.1158
Klein		*	*	•
VIF: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$		1	1	0
Klein: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$		1	1	0

Boxplots of R_{gboot}^2 and R_{jboot}^2 are presented in Figure 1. They show that the bootstrap distributions are centered at their means for Y , X_1 , X_2 and X_3 , respectively are 0.9073, 0.9308, 0.9432, 0.5274. We need to leave all variables in the initial model, the MTest function also gives us a clear idea of the variability in global R_g^2 : in our simulation, $0.9041 \leq R_g^2 \leq 0.9106$.

This bootstrap replicates open the possibility of applying other testing methods to check how statistically different the values are. For example, we apply a Kolmogorov-Smirnov (KS) test.

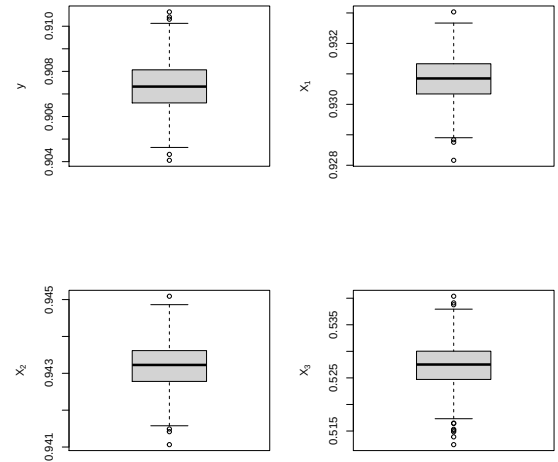


Figure 1. Boxplot results of the bootstrap procedure contained in $B_{n_{boot} \times (p+1)}$

A pairwise KS matrix of p-values is presented in Tables 2 and 3, we set the significance level $\alpha = 0.05$. The code for computing the pairwise KS matrix is detailed in Appendix C. Table 2 shows the pairwise p-values for the equality hypothesis of the n_{boot} replicates of variables in the rows compared to the variables in the columns. For example, the pairwise p-value between X_2 and X_3 (0) is lower

than α which rejects the equality hypothesis between them. Note that all the off-diagonal p-values also reject the hull hypothesis.

Table 2. Pairwise KS p-values of bootstrap samples $B_{n_{boot} \times (p+1)} \cdot \text{two.sided}$ is used as the alternative hypothesis.

	Y	X ₁	X ₂	X ₃
Y	1	0	0	0
X ₁	0	1	0	0
X ₂	0	0	1	0
X ₃	0	0	0	1

Table 3 shows the pairwise p-values of $B_{n_{boot} \times (p+1)}$. The null hypothesis is that the Cumulative Distribution Function of the variable in the row does lie below that of the variable in the column. In other words, we are testing if R^2 values in the rows are greater than the ones in the columns. Note that the first column is similar to testing $H_0 : \mu_{R_{X_j}^2} \geq \mu_{R_{Y_j}^2}$. For example, the first column tells us that X_1 and X_2 are greater than Y which is consistent with our previous findings.

Table 3. Pairwise KS p-values of bootstrap samples $B_{n_{boot} \times (p+1)} \cdot \text{greater}$ is used as the alternative hypothesis.

	Y	X ₁	X ₂	X ₃
Y	1	0	0	1
X ₁	1	1	0	1
X ₂	1	1	1	1
X ₃	0	0	0	1

Once candidate variables that may be causing multicollinearity are identified, some researchers decide to remove one or more of them. Note that results in Table 3 can also guide our decision on choosing whether X_1 or X_2 should be removed from the regression. If we take the sum over the rows in Table 3, this value gives us a metric that could be used to prioritize the removal of the variables. This is a metric of *how much* the variable in the row is greater than the one in the column. In this example, the row sum for X_2 is 4 and for X_1 is 3. It then suggests that X_2 is the one that should be removed.

4.2 Experiment 2

This experiment studies MTest vs rule of thumb VIF in (2) and contrasts its results. Following Salmerón-Gómez et al. (2018) and Salmerón-Gómez et al. (2021a), data is simulated as:

$$X_j = \sqrt{1 - \lambda^2} W_j + \lambda W_p,$$

where $j = 2, \dots, p$ with $p = 3, 4, 5$, $W_j \sim N(10, 100)$, $\lambda \in \{0.8, 0.82, 0.84, \dots, 0.98\}$ and $n \in \{20, 100, 200\}$. This setup let us specify different grades of collinearity (λ), different sample sizes (n) and different number of covariates (p).

Table 4 shows results for $p = 4$ and Appendix D for $p = 3$ (Table 9) and $p = 4$ (Table 10). We can see that all VIF troubling values are also detected by MTest, but there are cases where MTest detects multicollinearity and VIF does not (VIF threshold is 10). For example, with $\alpha = 0.05$, if $\lambda = 0.94$ and $n = 100$, MTest detects X_2 as a variable with potential multicollinearity but VIF does not ($VIF = 8.5$). All such these cases are in bold.

Table 4. Simulation results for VIF: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$ and VIF for $p = 4$. Different sample sizes (n) and grades of collinearity (λ).

n	λ	VIF: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$				VIF			
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
20	0.80	0.00	0.00	0.00	0.02	4.2	3.1	3.9	5.8
	0.82	0.00	0.00	0.00	0.04	4.5	3.4	3.3	6.0
	0.84	0.00	0.00	0.00	0.12	5.1	3.8	3.7	6.9
	0.86	0.00	0.00	0.00	0.28	5.8	4.3	4.3	8.0
	0.88	0.05	0.00	0.00	0.51	6.7	5.0	5.1	9.6
	0.90	0.21	0.03	0.04	0.78	8.0	6.0	6.2	11.9
	0.92	0.52	0.17	0.21	0.94	9.9	7.5	7.8	15.3
	0.94	0.86	0.58	0.69	0.99	13.2	10.0	10.7	21.0
	0.96	1.00	0.95	0.99	1.00	19.6	15.0	16.4	32.5
	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	38.9	30.1	34.0	67.6
100	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	3.1	2.7	2.7	6.5
	0.82	0.00	0.00	0.00	0.05	2.8	3.1	3.3	8.1
	0.84	0.00	0.00	0.00	0.30	3.1	3.4	3.6	9.3
	0.86	0.00	0.00	0.00	0.81	3.5	3.9	4.1	10.8
	0.88	0.00	0.00	0.00	0.99	4.0	4.4	4.7	12.8
	0.90	0.00	0.00	0.00	1.00	4.7	5.3	5.6	15.6
	0.92	0.00	0.00	0.00	1.00	5.7	6.5	6.9	19.8
	0.94	0.01	0.13	0.23	1.00	7.5	8.5	9.0	26.8
	0.96	0.83	0.97	0.99	1.00	11.1	12.4	13.3	40.8
	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	21.7	24.4	26.2	82.6
200	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	3.5	2.9	2.3	7.4
	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	3.4	3.1	3.2	8.3
	0.84	0.00	0.00	0.00	0.19	3.7	3.4	3.6	9.5
	0.86	0.00	0.00	0.00	0.94	4.2	3.9	4.0	11.1
	0.88	0.00	0.00	0.00	1.00	4.9	4.5	4.7	13.2
	0.90	0.00	0.00	0.00	1.00	5.8	5.4	5.6	16.2
	0.92	0.00	0.00	0.00	1.00	7.2	6.8	7.0	20.8
	0.94	0.21	0.05	0.16	1.00	9.5	9.0	9.3	28.3
	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	14.0	13.6	13.8	43.5
	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	27.7	27.3	27.7	89.0

5. APPLICATION

This section applies the proposed method to a dataset available in Longley (1967) and is used to show problems of multicollinearity. It is a time series from 1947 to 1962 where

- y : number of people employed, in thousands.
- x_1 : GNP implicit price deflator.
- x_2 : GNP, millions of dollars.
- x_3 : number of people unemployed in thousands.
- x_4 : number of people in the armed forces.
- x_5 : non institutionalized population over 14 years of age.
- time: year.

The regression model is given by

$$y = \phi_0 + \phi_1 x_1 + \phi_2 x_2 + \phi_3 x_3 + \phi_4 x_4 + \phi_5 x_5 + \phi_6 \text{time} \quad (3)$$

its global $R_g^2 = 0.996$ and its estimation is:

Table 5 shows the estimation of coefficients in equation (1). The p-value of the F statistic is closely equal to 0 which means that we can reject the null hypothesis that $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p = 0$. As mentioned in Gujarati et al. (2012), one symptom of the presence of multicollinearity is when we have a high R^2 and a few significant individual predictors. Which is the case in this application since out the six predictors, only three are statistically significant.

Table 5. Coefficient estimation of the application model: Equation (3).

	ϕ_i in Equation (3)
(Intercept)	67271.28* (23237.42)
x_1	-2.05 (8.71)
x_2	-0.03 (0.03)
x_3	-1.95** (0.48)
x_4	-0.96** (0.22)
x_5	0.05 (0.23)
time	1585.16* (482.68)
R^2	0.9955
Adj. R^2	0.9921
Num. obs.	15
RMSE	295.62

Figure 2 shows the bootstrap replicates of the dependent variable (*global*) and the predictors (x_1 to *time*). Boxplots suggest that x_2 , x_5 and *time* are candidate variables that generate multicollinearity problems. Furthermore, x_1 , x_3 and x_4 seem not to be greater than the dependent variable.

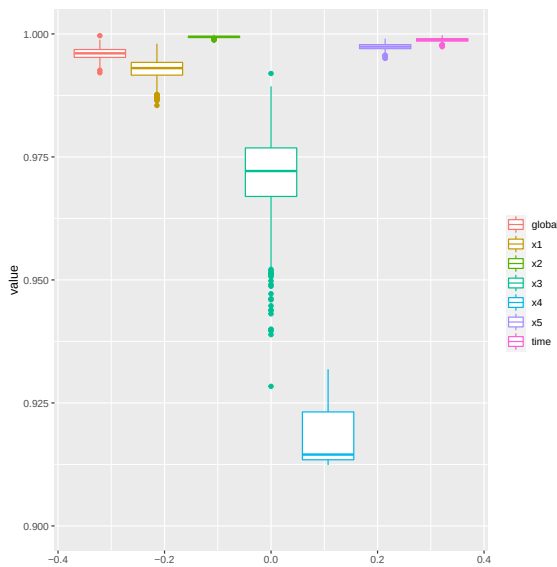


Figure 2. Boxplot of MTest results

Table 6 shows the results in a similar manner that the one shown in 1. According to the traditional VIF rule, all the variables yield multicollinearity problems except in x_4 (VIF threshold equal to 10). Traditional Klein's rule shows a multicollinearity problem in predictors x_2 , x_5 and *time*.

The MTest given by VIF: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$ shows multicollinearity problems in the same predictors that the traditional VIF did, but the value 0.003 gives us a confidence metric to reject the null hypothesis $H_0 : \mu_{R^2_{x_4boot}} \geq 0.90$.

Setting $\alpha = 0.05$, the MTest given by Klein's: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$ shows multicollinearity problems in predictors x_1 , x_2 , x_5 and *time*. That is, x_1 was identified as a predictor with potential multicollinea-

Table 6. R^2 for the global regression and auxiliary regressions are presented in the first row. VIF values are presented in the second row and Kleins's rule is presented with * denoting the variables that the rule identifies as a problem and with • the variables that do not.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	time
R^2	0.992	0.999	0.969	0.741	0.997	0.999
VIF	130	1491	32	4	348	746
Klein	•	*	•	•	*	*
VIF: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$	1	1	1	0.003	1	1
Klein: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$	0.065	1	0	0	0.907	0.998

ity problems but the traditional Klein did not. Note also that setting $\alpha = 0.10$, we could reject the null hypothesis $H_0 : \mu_{R^2_{x_1boot}} \geq \mu_{R^2_{sboot}}$.

Table 7 shows the pairwise p-values of $B_{n_{boot} \times (p+1)}$ from the application data. The null hypothesis is that the Cumulative Distribution Function of the variable in the row does lie below of the variable in the column. The first column is similar to testing $H_0 : \mu_{R^2_{x_3boot}} \geq \mu_{R^2_{yboot}}$. It tells us that the predictors that are greater than the response variable are x_2 , x_5 and x_6 , which is consistent with our intuition derived from Figure 2.

Table 7. Pairwise KS p-values of bootstrap samples $B_{n_{boot} \times (p+1)}$. greater is used as the alternative hypothesis.

	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	time
y	1	1	0	1	1	0	0
x_1	0	1	0	1	1	0	0
x_2	1	1	1	1	1	1	1
x_3	0	0	0	1	1	0	0
x_4	0	0	0	0	1	0	0
x_5	0.991	1	0	1	1	1	0
time	1	1	0	1	1	1	1

Table 7 can also help us decide which variable should be removed first. For example, in this case x_2 , *time* and x_5 would be the order of removing the predictors. This is achieved by checking the rows of Table 7, this may suggest the ordering of the removal. Respectively, the row sums of x_2 , *time* and x_5 are 7, 6, and 4.991.

In our application, after removing x_2 from the dataset, the p-values of the Klein's rule using MTest are 0.002, 0.000, 0.000, 0.314 and 0.845 for x_1 , x_3 , x_4 , x_5 and *time* respectively. Only after removing x_2 , *time* and x_5 multicollinearity was removed.

Nonetheless, this removal recommendation is a purely empirical approach. In this application, we could have divided x_2 by x_1 since this ratio (*realgni*) is a useful predictor as well, it is the real GNP. By doing this, and removing predictors x_5 and *time*, multicollinearity was also removed. This means that the theory behind the predictors could play a very important role when dealing with multicollinearity. The final model after this last consideration is shown in Table 8.

6. CONCLUSIONS

MTest is a bootstrap application for testing multicollinearity problems in the predictors. It lets us have a confidence metric, ASL, that given an α threshold helps us decide whether or not reject the null hypothesis stated in 3. The whole code generated for this article can be found at <https://github.com/vmoprojs/ArticleCodes/tree/master/MTest>.

Table 8. Coefficient estimation of the application model after removing variables causing multicollinearity.

ϕ_i in Equation (3) after removing variables	
(Intercept)	42716.56*** (710.12)
x_3	-0.68** (0.17)
x_4	-0.84** (0.22)
<i>realgni</i>	72.01*** (3.33)
R^2	0.9893
Adj. R^2	0.9864
Num. obs.	15

The application shows consistency with the numerical experiments. Both present MTest as a useful approach to test multicollinearity giving a *boosting* to the traditional rules in the sense that we can now have distributions of $\mu_{R^2_{x_{sgboot}}}$ and $\mu_{R^2_{x_{jboot}}}$ which are involved in the testing procedure.

A graphical representation of the bootstrap replicates were found to be very useful. In our application, MTest lets us have boxplots of the predictors and the dependent variable to guide our intuition and later perform a KS test.

The pairwise KS matrix of p-values is a complementary tool for testing multicollinearity derived from MTest. It can also help us decide which predictor has more potential multicollinearity problems.

This work can be extended to generalized linear models in the same manner that Fox and Weisberg (2019) did with the `vif` function contained in `car` package, but the general idea of MTest would remain the same. Another extension of MTest could be possible in the context of Ridge, Lasso or Elastic Net regression. The hyperparameters in these methods are usually selected through cross validation or repeated cross validation, and MTest could be implemented in these procedures.

REFERENCES

- Achen, C. H. (1982). *Interpreting and using regression*. Sage.
- Carrodus, M. L. and Giles, D. (1992). The exact distribution of R^2 when the regression disturbances are autocorrelated. *Economics Letters*, 4(38), 375-380. [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(92\)90021-P](https://doi.org/10.1016/0165-1765(92)90021-P)
- Dinov, I. D. (2016). Methodological challenges and analytic opportunities for modeling and interpreting Big Healthcare Data. *Gigascience*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13742-016-0117-6>
- Efron, B. (1992). Bootstrap methods: another look at the jackknife. *Breakthroughs in statistics* (pp. 569-593). Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
- Farrar, D. E. and Glauber, R. R., (1967). Identities for negative moments of quadratic forms in normal variables. *The Review of Economic and Statistics*, 49, 92-107. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2008.12.004>
- Fox, J. and Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression*, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Godfrey, L. (2009). *Bootstrap tests for regression models*. Springer.
- Gujarati, D. N. and Porter, D. C. and Gunasekar, S., (2012). *Basic econometrics*. McGraw-Hill, United States.
- Horowitz, J. L. (2001). *The bootstrap*. In Handbook of econometrics (Vol. 5, pp. 3159-3228). Elsevier.
- Imdadullah, M. and Aslam, M. and Altaf, S. (2016). mctest: An R Package for Detection of Collinearity among Regressors. *textitThe R Journal*, 8(2), 499-509. <https://doi.org/10.32614/RJ-2016-062>
- Jaya, I. G. N. M. and Ruchjana, B. and Abdullah, A. (2020). Comparison Of Different Bayesian And Machine Learning Methods In Handling Multicollinearity Problem: A Monte Carlo Simulation Study. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 15(18), 1998-2011.
- Klein, L.R. (1962). *An Introduction to Econometrics*. Prentice-Hall, Englewood, Cliffs, N. J., 101.
- Koerts, J. and Abrahamse, A. P. J. (1969). *On the theory and application of the general linear model*. Rotterdam University Press.
- Leamer, E. E., (1983). Model choice and specification analysis. *Handbook of econometrics*, 1, 285-330.
- Longley, J. W. (1967). An appraisal of least squares programs for the electronic computer from the point of view of the user. *Journal of the American Statistical association*, 62(319), 819-841. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10500896>
- Marcoulides, K. M. and Raykov, T. (2019). Evaluation of variance inflation factors in regression models using latent variable modeling methods. *Educational and psychological measurement*, 79(5), 874-882. <https://doi.org/10.1177/0013164418817803>
- Salmerón-Gómez, R. and García-García, C. and García-Pérez, J. (2018). Variance Inflation Factor and Condition Number in multiple linear regression. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 88(12), 2365-2384. <https://doi.org/10.1080/00949655.2018.1463376>
- Salmerón-Gómez, R. and García-García, C. and García-Pérez, J. (2020). Detection of Near-Multicollinearity through Centered and Noncentered Regression. *Mathematics*, 8(6), 931-948. <https://doi.org/10.3390/math8060931>
- Salmerón-Gómez, R. and García-García, C. and García-Pérez, J. (2021a). Obtaining a threshold for the Stewart index and its extension to ridge regression. *Computational Statistics*, 36, 1011-1029. <https://doi.org/10.1007/s00180-020-01047-2>

- Salmerón-Gómez, R. and García-García, C. and García-Pérez, J. (2021b). A guide to using the r package “multi-coll” for detecting multicollinearity. *Computational Economics*, 57(2), 529-536. <https://doi.org/10.1007/s10614-019-09967-y>
- Stein, M.L., (1975). *The detection of multicollinearity: A comment*. The Review of Economics and Statistics, 366-368. <https://doi.org/10.2307/1923926>
- The World Bank, (2021). World Development Indicators. <https://data.worldbank.org/> Accessed: 2010-11-16.
- Venables, W. N. and Ripley, B. D. (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0

BIOGRAPHY



Víctor Morales Oñate, PhD in Statistics from the University of Valparaíso, Master in Applied Mathematics (USFQ), Economics (FLACSO), Philosophy (PUCV), Financial Risks (UNIR) and Engineer in Economics and Finance from the National Polytechnic School. He works in Data Analytics in the private sector, is a re-

searcher and teacher of graduate programs.



Bolívar Morales Oñate, Telecommunications Engineer graduated from the National Polytechnic School and Master in Applied Mathematics from the San Francisco de Quito University. He works in statistical process control and is a professor at the Technical University of Ambato.

Appendix A. Data Generation Code

```
# ***** Data Generation
library(MASS)
rm(list = ls())
graphics.off()

# Sample size:
n <- 10000
# vector means
medias <- c(0,0,0)
# Correlation structure:
rho_12 <- -.945 # -.94
rho_13 <- .3
rho_23 <- -.5
# Coefficients of the regression:
betas <- c(10,-5,3,9)
s.d <- 3 # deviation of the residual

(Sigma <- matrix(c(1,rho_12,rho_13,
rho_12,1,rho_23,rho_13,rho_23,1),3,3))
set.seed(247)
# Predictors simulation:
X <- mvrnorm(n = n, medias, Sigma)
M <- cbind(1,X)
# Output simulation
y <- M %*% betas + rnorm(n,0,s.d)
datos <- data.frame(y,X)
```

Appendix B. Code for computing MTest

```
Mtest <- function(datos, nboot = 500,
                    nsam = NULL, trace = TRUE,
                    seed = NULL,
                    valor_vif = 0.9)
{
  if(is.null(nsam)){nsam = nrow(datos)*3}

  vals <- 1:nrow(datos)

  if(!is.null(seed)) {set.seed(seed)}

  sol.rsq <- NULL
  sol.vif <- NULL
  i = 1
  while(i <=nboot)
  {
    sam <- sample(vals,nsam,replace = TRUE)
    aux <- datos[sam,]
    maux <- lm(y~.,data = aux)
    sm <- summary(maux)
    vif.vals <- vif(maux)
    Raux <- (vif.vals-1)/vif.vals

    s1 <- c(sm$r.squared,Raux)
    sol.rsq <- rbind(sol.rsq,s1)
```

```

sol.vif <- rbind(sol.vif,vif.vals)

if(trace)
{
  cat("Iteration",i,"out of ",nboot,"\n")
}
i = i+1
}

pval_vif <- NULL
for(j in 2:ncol(sol.rsq))
{
  pval_vif <- c(pval_vif,
    sum(sol.rsq[,j]>valor_vif)/nboot)
}
names(pval_vif) <-
colnames(sol.rsq)[2:ncol(sol.rsq)]
pval_klein <- NULL
for(z in 2:ncol(sol.rsq))
{
  pval_klein <- c(pval_klein,
    sum(sol.rsq[,1]<sol.rsq[,z])/nboot)
}
names(pval_klein) <-
colnames(sol.rsq)[2:ncol(sol.rsq)]

colnames(sol.rsq) <- c("global",
paste(names(datos)[-1],sep = ""))
rownames(sol.rsq) <- 1:nrow(sol.rsq)
return(list(Bvals= sol.rsq,
pval_vif = pval_vif,pval_klein=pval_klein))
}

```

Appendix C. Code for the pairwise KS matrix of p-values

```

pairwise.ks.test <- function(X,
alternative="two.sided")
{
  #Returns the p value of the
  #pairwise KS test of X columns
  n <- ncol(X)
  sol <- matrix(NA, ncol = n,
nrow = n)
  for(i in 1:(n))
  {
    for(j in (1):n)
    {
      # print(c(i,j))
      a <- suppressWarnings(
ks.test(X[,i],X[,j],
alternative = alternative))
      # print(a$p.value)
      sol[i,j] <- a$p.value
    }
  }
}

```

```

}
if(alternative=="less")
{print("alternative hypothesis:
the CDF of x lies below that of y.
Rows are `x` and Columns are `y`")}
if(alternative=="greater")
{print("alternative hypothesis:
the CDF of x lies above that of y.
Rows are `x` and Columns are `y`")}
if(alternative=="two.sided")
{print("alternative hypothesis:
two-sided")}
colnames(sol) <- colnames(X)
rownames(sol) <- colnames(X)
return(sol)
}

```

Appendix D. Results of Experiment 3 when $p = 3$ and $p = 5$

Table 9. Simulation results for VIF: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$ and VIF for $p = 3$. Different sample sizes (n) and grades of collinearity (λ).

n	λ	VIF: $\widehat{ASL}_{n_{boot}}$			VIF		
		X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
20	0.80	0.00	0.00	0.00	4.8	2.6	4.9
	0.82	0.00	0.00	0.00	4.3	2.9	3.9
	0.84	0.00	0.00	0.00	4.7	3.2	4.3
	0.86	0.01	0.00	0.00	5.3	3.5	4.9
	0.88	0.02	0.00	0.01	6.1	4.1	5.7
	0.90	0.08	0.00	0.04	7.1	4.8	6.8
	0.92	0.27	0.01	0.24	8.7	5.9	8.4
	0.94	0.70	0.13	0.71	11.3	7.8	11.1
	0.96	0.97	0.79	0.99	16.5	11.6	16.5
	0.98	1.00	1.00	1.00	31.8	23.0	32.4
100	0.80	0.00	0.00	0.00	3.1	3.8	6.2
	0.82	0.00	0.00	0.00	2.8	2.4	4.1
	0.84	0.00	0.00	0.00	3.1	2.6	4.7
	0.86	0.00	0.00	0.00	3.5	3.0	5.5
	0.88	0.00	0.00	0.00	4.0	3.5	6.5
	0.90	0.00	0.00	0.02	4.8	4.2	8.0
	0.92	0.00	0.00	0.59	5.9	5.3	10.1
	0.94	0.01	0.00	1.00	7.7	7.2	13.8
	0.96	0.90	0.78	1.00	11.4	10.9	21.3
	0.98	1.00	1.00	1.00	22.5	22.6	43.9
200	0.80	0.00	0.00	0.00	3.7	3.2	6.5
	0.82	0.00	0.00	0.00	3.0	2.9	5.3
	0.84	0.00	0.00	0.00	3.4	3.2	6.1
	0.86	0.00	0.00	0.00	3.8	3.7	7.0
	0.88	0.00	0.00	0.00	4.4	4.2	8.3
	0.90	0.00	0.00	0.56	5.2	5.0	10.1
	0.92	0.00	0.00	1.00	6.4	6.3	12.8
	0.94	0.01	0.00	1.00	8.5	8.3	17.3
	0.96	1.00	1.00	1.00	12.5	12.4	26.3
	0.98	1.00	1.00	1.00	24.8	24.7	53.5

Table 10. Simulation results for VIF: $\widehat{ASL}_{nboot}$ and VIF for $p = 5$. Different sample sizes (n) and grades of collinearity (λ).

n	λ	VIF: $\widehat{ASL}_{nboot}$					VIF				
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
20	0.80	0.01	0.00	0.01	0.00	0.65	6.1	4.4	4.7	3.7	10.4
	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	3.4	3.5	2.6	2.7	7.3
	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	3.7	3.8	2.9	3.0	8.4
	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	4.2	4.3	3.3	3.3	9.8
	0.88	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	4.8	4.8	3.8	3.8	11.7
	0.90	0.03	0.02	0.00	0.00	0.97	5.7	5.6	4.6	4.4	14.4
	0.92	0.09	0.08	0.03	0.00	1.00	7.0	6.8	5.8	5.4	18.4
	0.94	0.40	0.40	0.26	0.08	1.00	9.2	8.7	7.8	7.0	25.2
	0.96	0.95	0.93	0.86	0.70	1.00	13.6	12.6	12.0	10.2	38.8
	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	26.8	23.9	24.9	19.8	80.0
100	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	4.0	3.5	3.1	3.8	12.5
	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	2.5	3.0	3.0	2.8	9.1
	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	2.8	3.3	3.4	3.2	10.5
	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	3.1	3.8	3.8	3.6	12.4
	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	3.6	4.4	4.4	4.2	14.9
	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	4.3	5.2	5.3	5.0	18.5
	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.4	6.4	6.6	6.3	23.8
	0.94	0.00	0.11	0.14	0.08	1.00	7.1	8.4	8.7	8.4	32.9
	0.96	0.76	0.95	1.00	0.98	1.00	10.7	12.5	13.1	12.7	51.1
	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	21.6	24.9	26.3	25.6	106.1
200	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	3.5	3.3	2.8	3.1	10.2
	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	3.6	3.3	3.1	3.4	11.4
	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	4.0	3.7	3.4	3.8	13.1
	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	4.5	4.2	3.9	4.3	15.3
	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.2	4.8	4.6	4.9	18.3
	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	6.2	5.8	5.5	5.8	22.5
	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	7.7	7.2	6.8	7.2	28.7
	0.94	0.56	0.27	0.13	0.25	1.00	10.1	9.5	9.2	9.4	39.1
	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	14.9	14.3	13.8	13.9	60.0
	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	29.1	28.5	27.9	27.1	122.6

Preparación y Caracterización de Complejos de Curcumina con Zinc(II), Níquel(II), Magnesio(II), Cobre(II) y su Evaluación Frente a Bacterias Grampositiva y Gramnegativa

Angulo-Cornejo, Jorge^{1,*} ; Delgado-Villanueva, Jenny¹ 

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Departamento Académico de Química Inorgánica, Lima, Perú.

Resumen: Se han preparado complejos metálicos de cobre(II), zinc(II), níquel(II) y magnesio(II) con el ligando curcuminato, en la relación molar 2:1 ligando:metal, en etanol como disolvente: $[M(\text{curcumina})_2]$ ($M = \text{Ni}^{2+}, \text{Cu}^{2+}, \text{Mg}^{2+} \text{ y } \text{Zn}^{2+}$). La relación estequiométrica ligando-metal (2:1) se determinó por el método espectrofotométrico de Job (método de las variaciones continuas). Los complejos fueron caracterizados por análisis elemental, espectrometría de masas, espectroscopia infrarroja, espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) y resonancia magnética nuclear (^1H -RMN, ^{13}C -RMN). En el complejo, cada curcuminato se enlaza al metal a través de dos átomos de oxígeno ($\text{C}=\text{O}$ y $\text{C}-\text{O}^-$) formando anillos quelatos de 6 miembros que actúan como un ligando bidentado. Los resultados del estudio antibacteriano de los complejos preparados frente a *Staphylococcus aureus* (grampositivo) y *Escherichia coli* (gramnegativo), a través el método Kirby-Bauer (método de difusión en Agar), revelan que todos los complejos presentan importante actividad antibacteriana frente al *Staphylococcus aureus*, destacándose el complejo de curcumina-zinc que presenta actividad biológica frente a esta bacteria aun a concentraciones bajas.

Palabras clave: curcumina, complejos de curcumina, actividad biológica, curcumina-metal, estudios espectrales

Preparation and Characterization of Curcumin Complexes with Zinc(II), Nickel(II), Magnesium(II), Copper(II) and their Evaluation Against Gram-positive and Gram-negative Bacteria

Abstract: Copper(II), zinc(II), nickel(II) and magnesium(II) complexes have been prepared with the ligand curcuminato, in a molar ratio of 2:1 ligand:metal, in ethanol as solvent: $[M(\text{curcumin})_2]$ ($M = \text{Ni}^{2+}, \text{Cu}^{2+}, \text{Mg}^{2+} \text{ and } \text{Zn}^{2+}$). Job's spectrophotometric method (method of continuous variations) was used to determine the stoichiometric Ligand-Metal ratio (2:1). A number of techniques were used to characterize the complexes, including elemental analysis, mass spectrometry, infrared spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and nuclear magnetic resonance (^1H -NMR, ^{13}C -NMR). Each curcuminato binds to the metal through two oxygen atoms ($\text{C}=\text{O}$ and $\text{C}-\text{O}^-$), forming six-membered chelate rings. The results of the antibacterial study of the complexes prepared against *Staphylococcus aureus* (gram-positive) and *Escherichia coli* (gram-negative), by means of the Kirby-Bauer method (agar diffusion method), indicate that all of the complexes present significant antibacterial activity against *Staphylococcus aureus*, particularly the curcumin-zinc complex, which has significant antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* even at low concentrations.

Keywords: curcumin, curcumin complexes, biological activity, curcumin-metal, spectral studies

1. INTRODUCCIÓN

La formación de complejos metálicos con curcumina atrajo mucho interés en los últimos años como uno de los requisitos para el tratamiento de la enfermedad de Alzheimer y actividad antioxidante. Sin embargo, según el reporte obtenido de la revisión de la base de datos: Chambridge Structural Data

Base CSDB revisión 06/2021, la literatura no reporta las estructuras moleculares de complejos metálicos de cobre, zinc, magnesio y níquel con el ligando curcuminato exclusivamente; aun cuando existe información de algunos complejos metálicos con ligandos mixtos de curcumina y otros ligandos.

*janguoloc@unmsm.edu.pe
Recibido: 22/06/2022
Aceptado: 24/11/2022
Publicado en línea: 01/05/2023
10.33333/rp.vol51n2.06
CC 4.0

Se han reportado importantes investigaciones sobre la estabilización de la curcumina por complejación con cationes divalentes (zinc, magnesio y cobre) en el sistema de glicerol/agua. Estos resultados se soportaron en propuestas estructurales, basados en cálculos experimentales para los complejos metálicos de curcumina estudiados (Zebib et al., 2010). En la literatura, se reportan también, algunos compuestos ternarios de curcumina, sintetizados por la reacción de un nitrato metálico $M(NO_3)_2$ con curcumina como ligando primario y 1,10-fenantrolina (phen) como ligando de soporte en solución de agua / etanol en atmósfera de nitrógeno. La fórmula general de los complejos es $[M(Cur)(fen)]NO_3$ ($M = Ni^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}$ y Zn^{2+}) y los resultados de la actividad biológica indicaron que los complejos metálicos de la curcumina tienen una buena capacidad antibacteriana comparado con la del ligando libre curcumina (Ismail et al., 2014). En la última década, se ha reportado la síntesis de complejos de cobre(II) (Barik et al., 2016) y del complejo de zinc(II) (Sareen et al., 2016), con la curcumina en la relación estequiométrica metal : ligando 1:1.

La curcumina es un compuesto que se presenta en dos formas tautoméricas: la enólica y la cetónica (Figura 1) tal como lo señala González-Albadalejo et al. (2015). La preparación de los complejos metálicos (zinc, cobre, níquel y magnesio) se realiza por reacción de la curcumina con las sales de los correspondientes iones metálicos y se ve favorecida por la pérdida de un hidrógeno del grupo enólico (OH) y la formación del anillo quelato a través de los oxígenos de los grupos enólico (desprotonado) y cetónico del ligando (González et al., 1986).

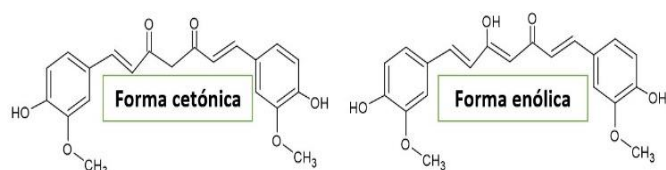


Figura 1. Tautómeros de la curcumina

Uno de los problemas que presenta la curcumina es su escasa disponibilidad biológica tras su ingesta oral, debido a que se absorbe relativamente poca curcumina y la parte que sí llega al torrente sanguíneo se degrada con rapidez (Prasad et al., 2021; Dulbecco & Savarino, 2013). Para mejorar las propiedades farmacológicas de la curcumina, se sintetizaron complejos de curcumina con los elementos: boro, cobalto, cobre, galio, gadolinio, oro, lantano, manganeso, níquel, hierro, paladio, platino, rutenio, plata, vanadio y zinc. Estos estudios revelaron que los complejos metal-curcumina han demostrado eficacia contra varias enfermedades crónicas, incluyendo cáncer, artritis, osteoporosis y enfermedades neurológicas como el Alzheimer. Estas actividades biológicas de los complejos metal-curcumina fueron asociados con la modulación de mediadores inflamatorios, factores de transcripción, peroxidación lipídica, enzimas antioxidantes y han mostrado utilidad en imágenes biológicas y radio imágenes. El futuro uso de los complejos metálicos de curcumina puede representar un nuevo enfoque en la prevención y tratamiento de enfermedades crónicas (Prasad et al., 2021) y de manera particular de trastornos intestinales inflamatorios y neoplásicos (Dulbecco & Savarino, 2013). La formación de complejos metálicos bioactivos puede conducir

a la generación de nuevos metalofármacos con actividades bioquímicas y farmacológicas mejoradas respecto a la curcumina (Halevas et al., 2020).

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Preparación de los complejos metálicos de curcumina

Los complejos ML_2 ($M: Cu^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, Mg^{2+}$; L : curcumina), fueron preparados mediante una reacción entre la curcumina con las correspondientes sales metálicas ($Cu(CH_3COO)_2$, $Zn(CH_3COO)_2$, $MgCl_2$, $NiCl_2$). Se pesa 10 mmol de curcumina, se disuelve en 50 mL de etanol en agitación constante a 30°C, luego a temperatura ambiente se agrega 5 mL de NaOH 0,1N para ajustar el pH de la solución de la curcumina a 7,5-9,5 y precipitar los complejos metálicos y finalmente, se agrega gota a gota (5 mmol) de la respectiva sal metálica disuelta en 20 mL de etanol. La mezcla se agita a temperatura ambiente durante 3 horas. El precipitado se filtra y se lava con agua luego con etanol y finalmente el compuesto húmedo se seca a 70-80°C.

El método de las variaciones continuas (Angelici, 1979), nos permite determinar la relación estequiométrica metal: ligando en el complejo preparado, de acuerdo con el procedimiento 3.2 Determinación de la relación metal ligando por el método de Job.

La reacción de formación del complejo es: $M + nL \rightleftharpoons ML_n$, donde M : cobre(II), zinc(II), magnesio(II), níquel(II), L es el ligando (L : curcumina). Para aplicar el método de las variaciones continuas se prepararon una serie de soluciones manteniendo constante la concentración total del ligando más el ion metálico: ($C_T = C_M + C_L = \text{constante}$) mientras se varía la fracción molar del ligando ($X_L = C_L/C_T$) entre 0 y 1, según propone Angelice (1979).

2.2 Técnicas de Caracterización

Para conocer la naturaleza del enlace de la curcumina y sus complejos (cobre(II), zinc(II), magnesio(II), níquel(II)), se han utilizado diferentes técnicas espectroscópicas, tales como espectroscopia de absorción UV-Visible en un equipo Genes ys 10S UV/Vis Thermo Fisher Scientific, espectroscopia de resonancia magnética nuclear de la Universidad de Málaga España, utilizando un equipo espectrómetro de RMN 400 Plus Avance III Bruker, (en el caso del complejo de cobre(II) no se utilizó la espectroscopia de resonancia magnética nuclear por tratarse de un complejo paramagnético); ESCA (XPS), en un espectrómetro PHI 5000 Versa Probe II (Universidad de Málaga España), espectroscopia infrarroja marca Shimadzu, modelo IR affinity y los espectros de masas en un equipo acoplado ICPMS/MS Agilent 8900 de la Universidad de Burgos España.

2.3 Ensayo de actividad antibacteriana

Las actividades antibacterianas in vitro de la curcumina y sus complejos de magnesio, zinc, y cobre, fueron estudiados por el método Kirby-Bauer o método de difusión en Agar (Bauer et al., 1966) (no se trabajó con níquel por su baja solubilidad en el solvente utilizado). Las cepas elegidas fueron las

Escherichia coli G (-) con cepa tipo ATCC 25922, y *Staphylococcus aureus* G (+) con cepa tipo ATCC 25923. Se prepararon pequeños trozos circulares de papel filtro de 6 mm de diámetro para rodajas bacteriostáticas.

La curcumina y sus complejos se disolvieron en 10 mL de DMSO (1%) para obtener concentraciones de 1×10^8 UFC/mL (UFC: estándares de McFarland). Se tomaron 0.5 mL de las muestras homogenizadas y se impregnó cada disco con la concentración al 100%, 75%, 50% y 25% de curcumina y sus complejos durante 24 horas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los complejos se prepararon por reacción etanólica de curcumina con soluciones del correspondiente ion metálico ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, MgCl_2 , NiCl_2). Cada complejo se preparó en la relación molar 1:2 (metal: ligando) obteniéndose complejos metálicos del tipo ML_2 donde (M: Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} , L: curcumina). Los rendimientos obtenidos son buenos: curcumina-cobre 81%, curcumina-zinc 85%, curcumina-níquel 73% y curcumina-magnesio 83%. Todos los complejos son estables a temperatura ambiente y su punto de fusión es mayor a 184°C , todos los complejos son solubles en DMSO y etanol (excepto el complejo de níquel que es parcialmente soluble). Los complejos fueron caracterizados por sus espectros de masas, UV-Visible, Infrarrojo, Resonancia Magnética Nuclear (^1H -RMN, ^{13}C -RMN y espectros bidimensionales), espectros XPS C1s, XPS O1s, XPS Zn2p3/2, XPS Ni2p3/2, XPS Mg2p3/2 y XPS Cu2p3/2, que confirman que los complejos tienen una relación metal ligando (1:2) ML_2 .

3.1 Determinación general del máximo de absorción de los complejos de cobre(II), níquel(II), magnesio(II) y zinc(II)

Las soluciones en etanol de los complejos metálicos presentan dos bandas principales de absorción de transición π - π^* a 428 y 435nm (níquel); 426 y 449nm (cobre); 429 y 439nm (magnesio); 432 y 441nm (zinc). Si comparamos con el espectro de la curcumina se observa un desplazamiento entre (7 y 23nm), lo que indica la participación del grupo carbonilo de la curcumina en la formación de los diferentes complejos metálicos, la variación del máximo de absorción de curcumina y las dos bandas que presentan los diferentes complejos depende de la naturaleza del ion metálico (M^{n+}). Estos valores son consistentes con los observados en estudios similares (Subhan et al., 2014).

3.2 Determinación de la relación metal-ligando por el método de Job

Para determinar la relación molar metal-ligando por el método espectrofotométrico de las variaciones continuas de JOB, se siguió el procedimiento propuesto en la literatura (Angelice, 1979), que consiste en realizar las mediciones de las absorbancias de cada una de las mezclas de la serie de soluciones preparadas. Las mediciones se realizaron

manteniendo fija la longitud de onda del máximo de absorción de la curcumina (486 nm) y de cada complejo metálico estudiado: curcumina-zinc ($\lambda_{\text{max}} = 432$ y 441 nm); curcumina-níquel ($\lambda_{\text{max}} = 428$ y 435 nm); curcumina-magnesio ($\lambda_{\text{max}} = 429$ y 439 nm) y curcumina-cobre ($\lambda_{\text{max}} = 426$ y 449 nm), que permitió graficar la absorbancia versus fracción molar del ligando. La relación molar metal: curcumina se obtiene del gráfico Absorbancia (Abs) versus fracción molar de la curcumina (X_L), la fracción molar del ion metálico (X_M) se obtiene considerando la siguiente ecuación: $X_M = 1 - X_L$. Gráficamente se determinó el máximo de absorción del complejo, cuyo valor corresponde al punto donde se cortan las dos pendientes definidas en la curva graficada (Abs versus X_L) para cada complejo, la fracción molar de la curcumina que corresponde a esta absorbancia máxima obtenida para cada complejo (M: Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+}) es $X_L = 0,67$ y $X_M = 0,33$ para los iones metálicos. La relación molar ligando/metal (1:2) ML_2 , se obtiene considerando la relación de fracciones: $n = (X_{\text{curc.}} / X_{\text{M}^{2+}})$.

3.3 Espectro FT-IR de los complejos cobre(II), níquel(II), magnesio(II) y zinc(II) con la curcumina

El espectro FT-IR de la curcumina presenta una señal aguda a 3511 cm^{-1} atribuido al grupo hidroxilo del fenol (Ar-OH) y otra señal más ancha a 3401 cm^{-1} , atribuido a la forma enólica (R-OH) de la curcumina. Sin embargo, al comparar estas señales con los espectros de cada complejo, se observan que solo presentan una sola señal de banda ancha que corresponde al grupo hidroxilo del fenol a longitudes de onda más bajas: níquel: Ar-OH 3445 cm^{-1} ; cobre, magnesio y zinc: Ar-OH 3425 cm^{-1} . La ausencia de la señal (R-OH) en los complejos indica el reemplazo del protón enólico por el metal en la formación del complejo (Nakamoto, 2006). El espectro IR del ligando curcumina mostró señales de estiramiento (C = O) en 1628 cm^{-1} y la señal de la forma tautomérica enólica (C = C) a 1600 cm^{-1} , estos datos son muy similares a lo encontrado por otros autores (Angulo-Cornejo, 1986). En los espectros de los complejos metálicos, estas señales se muestran con un desplazamiento a menor energía, indicando que estos grupos están involucrados en la unión con el ion metálico: níquel: C=O 1621 cm^{-1} , C=C 1582 cm^{-1} ; cobre: C=O 1618 cm^{-1} , C=C 1590 cm^{-1} ; magnesio: C=O 1620 cm^{-1} , C=C 1591 cm^{-1} ; zinc: C=O 1622 cm^{-1} , C=C 1583 cm^{-1} . La señal IR que corresponde al grupo CH=CH, en el ligando se observa a 1510 cm^{-1} y en el caso de los complejos se muestra el desplazamiento de esta señal hacia campos más altos: níquel: 1491 cm^{-1} ; magnesio: 1502 cm^{-1} ; zinc: 1490 cm^{-1} ; cobre: 1503 cm^{-1} , debido a que el carácter π del doble enlace disminuye por la influencia del enlace con el metal (L—M).

Esto sugiere que, en la formación de los complejos, el ligando se coordina con los iones metálicos a través del grupo C = O. Los detalles de las principales asignaciones de las absorciones para cada uno de los complejos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Bandas de absorción IR más importantes de la curcumina y los complejos

Asignación	Frecuencia cm^{-1}				
	curcumina	Ni(curc.) ₂	Mg(curc.) ₂	Zn(curc.) ₂	Cu(curc.) ₂
Estiramiento (O-H)(fenol)	3511	3445	3425	3425	3425
O-H (enol)	3401	-	-	-	-
C-H (aromático)	3000-2930	2928-2822	2995-2830	2926-2821	2999-2832
C=O	1628-1600	1621-1582	1620-1591	1622-1583	1618-1590
C=C	1510	1491	1502	1490	1503
C-O (fenol)	1280	1277	1275	1278	1277
O (O-CH ₃)	1030	1027	1027	1027	1028
C-H	978	975	975	975	974

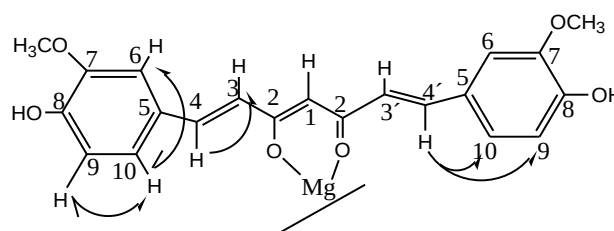
curc: curcumina

3.4 Espectros de resonancia magnética nuclear (¹H-RMN, ¹³C-RMN, COSY, HMQC Y DEPT135) de los complejos metálicos de níquel(II), zinc(II) y magnesio(II)

Las señales de ¹H-RMN del complejo curcumina-magnesio se observan mucho más desplazados a campos más altos en comparación con la curcumina, se muestran las señales: H1 metino: 5,58ppm; CH₃O: 3,8 ppm; Ar-OH: 9,40 ppm.

En el espectro COSY del complejo curcumina-magnesio en DMSO deuterado, se observa que el protón H3 está acoplado con el protón H4; (curcumina-magnesio; H3: 6,61ppm / H4: 7,29ppm) lo que confirma que estos son protones vecinos, si lo comparamos con el espectro del ligando (Grabner & Modéc, 2019; Payton et al., 2007) en DMSO (curcumina; H3: 6,73ppm / H4: 7,55ppm), se observa el desplazamiento químico de las señales, este comportamiento es coherente con lo encontrado en el espectro IR del complejo para la señal del grupo CH=CH que se desplaza a 1502 cm^{-1} respecto a la señal observada en el ligando 1510 cm^{-1} . El protón H9 (6,76ppm) está acoplado con H10 (6,99ppm), lo que indica que H9 y H10 son protones vecinos. En el espectro también se observa que el protón H9 está acoplado a más de un enlace con un protón que está desplazado a 7,44ppm. Posiblemente este protón corresponda al grupo H4', de aquí deducimos que los protones H4 y H4' no son equivalentes tal como se observa en el espectro COSY del complejo con más claridad debido a que son próximos al grupo aromático. Los desplazamientos químicos de los protones H3 y H3' son muy cercanos que no se pueden distinguir y son observados como una señal única.

La señal de H4' es un doblete de menor intensidad que el doblete H4 debido a que el acoplamiento de este protón con H9 está influenciado por la deslocalización de los electrones en el anillo quelato (Figura 2). La señal singlete en el espectro COSY corresponde al acoplamiento a más de un enlace entre los protones H6 (7,19ppm) y H10(6,99ppm), respectivamente. El desplazamiento químico del protón H3, H4, H6, H10 y H1 se encuentran a campos altos debido a la influencia del metal coordinado que forma un anillo quelato de 6 miembros.

**Figura 2.** Acoplamientos observados en el espectro COSY del complejo de curcumina-magnesio

En el espectro ¹H-RMN del complejo curcumina-níquel, la señal que corresponde al protón H1(5,57ppm, metino), muestra un desplazamiento a campos altos en comparación con lo observado en el ligando (6,07ppm metino), el desplazamiento de la señal es debido al desplazamiento de la densidad electrónica hacia el centro metálico en el complejo, a 3,89ppm se muestra la señal del grupo CH₃O, el grupo OH es observado a 9,5ppm. En el espectro COSY del complejo curcumina-níquel en DMSO deuterado se observa que el protón H3(6,67ppm) está acoplado con H4 (7,41ppm), lo que confirma que estos son protones vecinos. Estos desplazamientos químicos son importantes si lo comparamos con el espectro del ligando en DMSO; por ejemplo, el protón H3 que es observado a 6,73 ppm en el ligando se desplaza a 6,67 ppm en el complejo de níquel y la señal del protón H4 que aparece a 7,55ppm en el ligando, es observada a 7,41 ppm en el complejo. Este comportamiento es coherente con lo encontrado en el espectro IR del complejo para la señal del grupo CH=CH que se desplaza a 1491 cm^{-1} respecto a la señal observada en el ligando 1510 cm^{-1} . En el espectro COSY del complejo de níquel las señales de H3 y H4 aparecen superpuestas con H3' y H4' respectivamente, debido a la influencia del anillo quelato que se forma con el metal. La estabilidad del complejo de níquel se ve favorecido por la interacción de los oxígenos (bases duras) con el metal (Angulo-Cornejo & Beyer, 2010).

Los protones aromáticos del complejo curcumina-níquel presentaron un ligero desplazamiento con respecto al espectro

de la curcumina. Así por ejemplo los protones H9 (6,77ppm, doblete) que están acoplados con H10 (7,06ppm, doblete), se muestran ligeramente desplazados respecto a la señal de la curcumina H9 (6,8ppm, doblete) y H10 (7,13ppm, doblete).

En el espectro ^1H -RMN del complejo curcumina-zinc, la señal que corresponde al protón metino (H1) se observa a 5,57ppm, la señal está desplazada a campos altos porque el zinc genera una modificación química en el complejo, en comparación con la señal observada del protón metino de la curcumina a (6,07ppm). El grupo CH_3O se muestra a 3,88ppm y la señal del grupo OH del fenol del complejo curcumina-zinc se observa a 9,5ppm. Estos resultados son muy similares a los reportados para el complejo penta coordinado de zinc(II) con ligandos mixtos carboxilato monodentado y los quelantes curcuminato y 2, 20-bipiridina (Grabner & Modéc, 2019).

En el espectro COSY del complejo curcumina-zinc en DMSO deuterado se observa que el protón H3(6,66ppm) está acoplado con H4 (7,40ppm), lo que confirma que estos son protones vecinos. Si lo comparamos con el espectro del ligando en DMSO; por decir el protón H3 que es observado a 6,73 ppm en el ligando se desplaza a 6,66 ppm en el complejo de zinc y la señal del protón H4 que aparece a 7,55ppm en el ligando, es observado a 7,40 ppm en el complejo.

Como en el caso de los otros complejos, este comportamiento es coherente con lo encontrado en el espectro IR del complejo de zinc, para la señal del grupo $\text{CH}=\text{CH}$ que se desplaza a 1490cm^{-1} respecto a la observada en el ligando 1510cm^{-1} . El protón H9 (6,76ppm) está acoplado con H10 (7,05ppm), lo que indica que H9 y H10 son protones vecinos. En el espectro también se observa que el protón H9 está acoplado a más de un enlace con el protón H (7,48ppm, posiblemente este protón corresponda al grupo H4'). Queda claro que el H4 y H4' no son equivalentes, su desplazamiento químico es observado en el espectro COSY del complejo con más claridad debido a que son próximos al grupo aromático, en cambio H3 y H3' tienen un desplazamiento químico muy aproximado.

En el espectro de ^{13}C -RMN (Tabla 2) de los complejos, todos los carbonos tuvieron una pequeña variación en comparación con la curcumina. Los valores asignados a cada señal están respaldados por los espectros HMQC al igual que los espectros DEPT-135, demuestran que en la estructura de los complejos no existe el grupo CH_2 , confirmando de esta manera que los complejos se formaron con el ligando curcumina de estructura enólica (Jiang, et al., 2011). La Tabla 2, resume los resultados obtenidos en los espectros RNM unidimensionales.

Tabla 2. Análisis por RMN Unidimensional de la curcumina y los complejos (níquel, zinc y magnesio)

Posición	^1H -RMN δ (ppm)				^{13}C -RMN δ (ppm)			
	curcumina	Zn(curc.) ₂	Ni(curc.) ₂	Mg(curc.) ₂	Curcumina	Zn(curc.) ₂	Ni(curc.) ₂	Mg(curc.) ₂
C-1	6,07(s)	5,57	5,57	5,58	100,9	101,5	100,8	101,3
C-2	15,50	-	-	-	183,4	183,1	182,5	182,9
C-3	6,70(d)	6,66	6,67	6,61	121,3	121,2	121,6	121,4
C-4	7,50(d)	7,40	7,41	7,29	140,9	139,5	141,1	140,4
C-5	-	-	-	-	126,5	126,3	126,0	126,8
C-6	7,32(s)	7,23	7,24	7,19	111,5	111,0	111,6	111,2
C-7	-	-	-	-	148,3	148,0	148,2	147,9
C-8	9,60(s)	9,58	9,57	9,60	149,5	149,0	148,5	148,2
C-9	6,80(d)	6,76	6,77	6,76	115,9	115,0	116,0	115,6
C-10	7,13(dd)	7,05	7,06	6,99	123,3	123,3	122,6	122,5
OCH ₃	3,90(s)	3,88	3,89	3,88	55,9	55,7	55,6	55,4

curc: curcumina

3.5 Espectrometría de masas de los complejos metálicos de cobre(II), zinc(II), magnesio(II) y níquel(II)

Los complejos metálicos de curcumina fueron caracterizados por sus espectros de masas ESI+ (m/z), los cuales mostraron picos correspondientes a los iones moleculares de cada complejo; ($[\text{MgL}_2]^+ = 758,2408\text{uma}$), ($[\text{NiL}_2]^+ = 792,1308\text{uma}$), ($[\text{CuL}_2]^+ = 797,17448\text{uma}$), ($[\text{ZnL}_2]^+ = 799,8839\text{uma}$) que confirman la formación de cuatro complejos quelatos de la curcumina con cobre(II), níquel(II), magnesio(II) y zinc(II): Bis(curcuminato)cobre(II), Bis(curcuminato)níquel(II), Bis(curcuminato)magnesio(II) y

Bis(curcuminato)zinc(II), unidos a través de los dos oxígenos de cada molécula de curcuminato.

También se identificaron picos que corresponden a la eliminación sucesiva de grupos arilo $[\text{Ar}]^+$ en los complejos metálicos de cobre, zinc, magnesio y níquel. Así mismo, se han identificado algunos fragmentos derivados del complejo y del ligando. En la Figura 3, se observan los principales fragmentos de masa que han sido identificados, en el espectro de masas del complejo de curcumina-cobre.

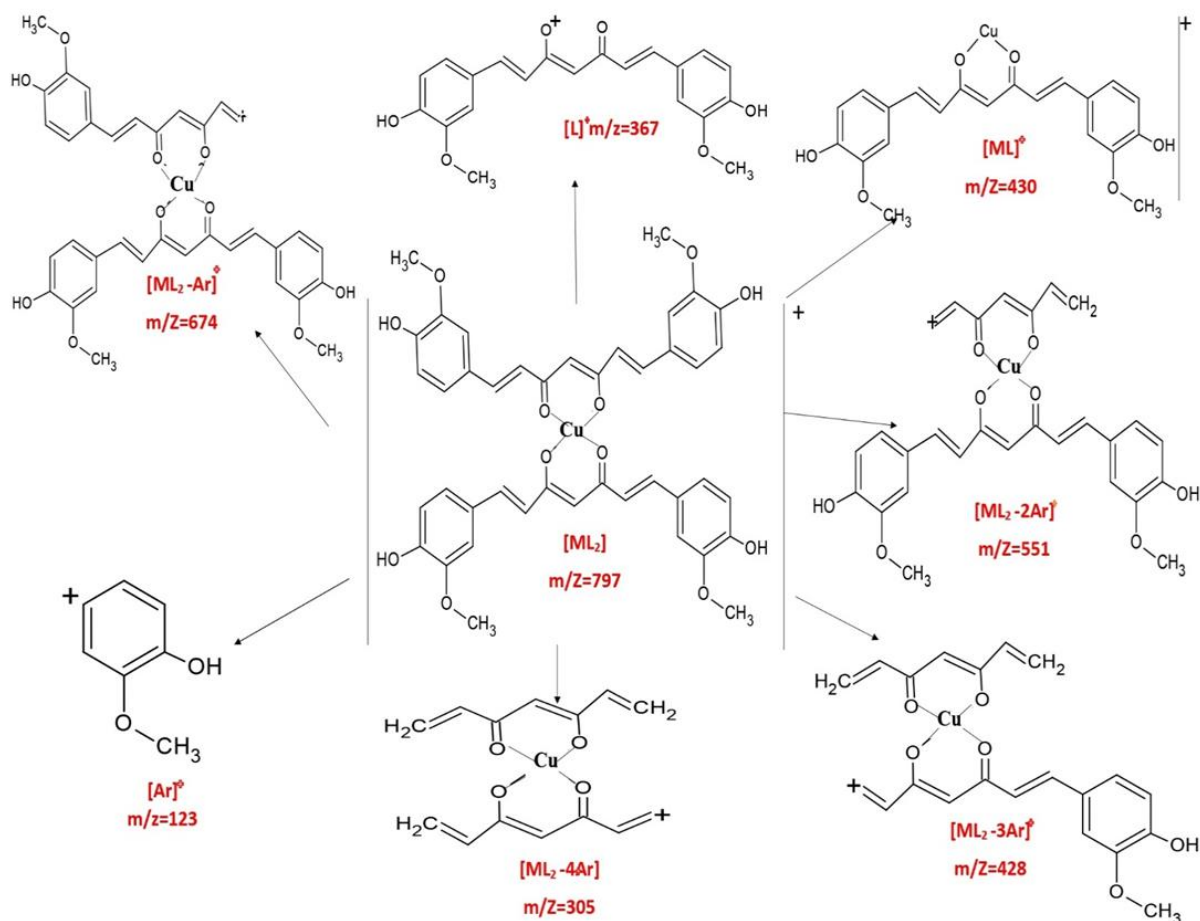


Figura 3. Algunos fragmentos identificados en el espectro de masas ESI+ (m/z) del complejo curcumina-cobre

Tabla 3. Fragmentos más importantes del espectro de masa de la curcumina y los complejos

Ion molecular principal [L] ⁺ m/z : 369.1342	Fragmentos de curcumina m/z			
	245,2113	177,9401	123,1252	145,1252
Asignaciones	[CuL ₂] m/z	[NiL ₂] m/z	[ZnL ₂] m/z	[MgL ₂] m/z
[ML ₂] ⁺	797,1744	792,1302	799,8839	758,2408
[ML] ⁺	430,2612	425,2232	432,2980	391,1158
[ML ₂ -Ar] ⁺	674,3188	669,2352	676,2146	635,2025
[ML ₂ -2Ar] ⁺	551,1308	546,4121	553,2562	512,3764
[ML ₂ -3Ar] ⁺	428,3120	423,123	430,2120	389,1023
[ML ₂ -4Ar] ⁺	305,2612	300,2331	307,2613	266,9544
[L] ⁺	367,1336	367,2542	367,3251	367,3410
Fragmentos del	145,3212	177,2331	123,5236	123,2231
ligando.	177,2124	285,2742	177,4523	177,9400

3.6 Espectros de rayos-X (XPS) de los complejos de cobre(II), níquel(II), magnesio(II) y zinc(II)

En la Figura 4, se observan los espectros XPS O1s de los complejos de cobre, níquel, magnesio y zinc, en el que se observó una señal intensa a 533,5eV, que corresponde al enlace (C-O) del (OCH₃, OH) que es similar a la observada en la curcumina (Tabla 4). En los espectros XPS O1s de los complejos metálicos con la curcumina, también se observaron dos señales muy cercanas en energía, una que corresponde al grupo C-O-metal (531,2 eV; curcumina-Mg), (531,3 eV; curcumina-Ni), (531,6 eV; para curcumina-M; M= Cu y Zn) y

la otra señal que corresponde al Grupo C=O-metal. (531,4 eV; curcumina-Cu), (531,2 eV; curcumina-Zn), (531,3 eV; para curcumina-M; M= Mg y Ni), estos valores de energía son similares a los observados por otros autores para compuestos similares (Angulo et al., 2000; Moulder et al., 1992; Lino-Pacheco, 2022). En la curcumina solamente se observa una señal a 532,3 eV; lo que indica que en el estado sólido la forma predominante de la curcumina es la forma cetónica, en cambio en el complejo (preparado en solución de etanol) se forma el enlace con el metal a través del oxígeno C-O y C=O, por deprotonación del OH (de la forma enólica).

El espectro XPS C1s (Tabla 4) de los complejos de cobre, níquel, magnesio y zinc muestran dos señales muy similares a la encontrada en la curcumina (grupo bencénico y C=C; 285,1eV), (C-O-H, C-O-C; 286,0eV). En los complejos la señal intensa corresponde al enlace (grupo bencénico y C=C) (285,0 eV; para curcumina-M; M= Cu, Zn, Mg y Zn), la otra señal de baja intensidad corresponde al enlace (C-O-H, C-O-C), (285,9 eV; para curcumina-M; M= Cu, Mg), (286,0 eV; para curcumina-M; M= Ni y Zn). No hay cambios significativos en los espectros XPS C1S de los complejos, por tanto, la unión del metal con el ligando no involucra al carbono directamente. La señal de C=O, se observa a 286,5eV para todos los complejos (Cu, Zn, Ni y Mg). Se encontró que la energía del grupo C=O se desplaza alrededor de 0,3eV comparado con la señal del ligando (C=O; 286,8eV), que demuestra la participación del resto C=O en la unión de la curcumina con los metales (Tabla 4). Estudios similares fueron

observados en compuestos equivalentes (Angulo et al., 2000). En la Tabla 5, se asignan las energías de enlace (eV) observados en los espectros XPS Cu2p3/2 (934,86eV), XPS Mg 2p3/2 (50,52eV), XPS Ni2p3/2 (856,18eV) y XPS

Zn2p3/2 (1022,8eV) que confirma la presencia de los iones metálicos en su estado de oxidación 2+, según de reportes de la literatura similares (Angulo et al., 2000; Moulder et al., 1992; Lino-Pacheco, 2022).

Tabla 4. Energías de enlace del O1s, C1s para la curcumina y complejos

O1s						C1s					
Grupo funcional	curc. (eV)	CuL ₂ (eV)	NiL ₂ (eV)	ZnL ₂ (eV)	MgL ₂ (eV)	Grupo funcional	curc. (eV)	CuL ₂ (eV)	NiL ₂ (eV)	ZnL ₂ (eV)	MgL ₂ (eV)
C-O	533,5	533,5	533,5	533,5	533,5	Ar. CH=CH	285,1	285,0	285,0	285,0	285,0
C-O-M	532,3	531,6	531,5	531,6	531,4	C-O-H	286,0	285,9	286	286,0	285,9
C=O		531,4	531,3	531,4	531,2	C-O-C					
						C=O	286,8	286,5	286,5	286,5	286,5

Tabla 5. Energías de enlace obtenidos de los espectros XPS Zn2p3/2, XPS Ni2p3/2, XPS Mg2p3/2 y XPS Cu2p3/.

Metal	Energía de enlace (eV)
Zn ²⁺	1022,8
Ni ²⁺	856,18
Mg ²⁺	50,52
Cu ²⁺	934,86

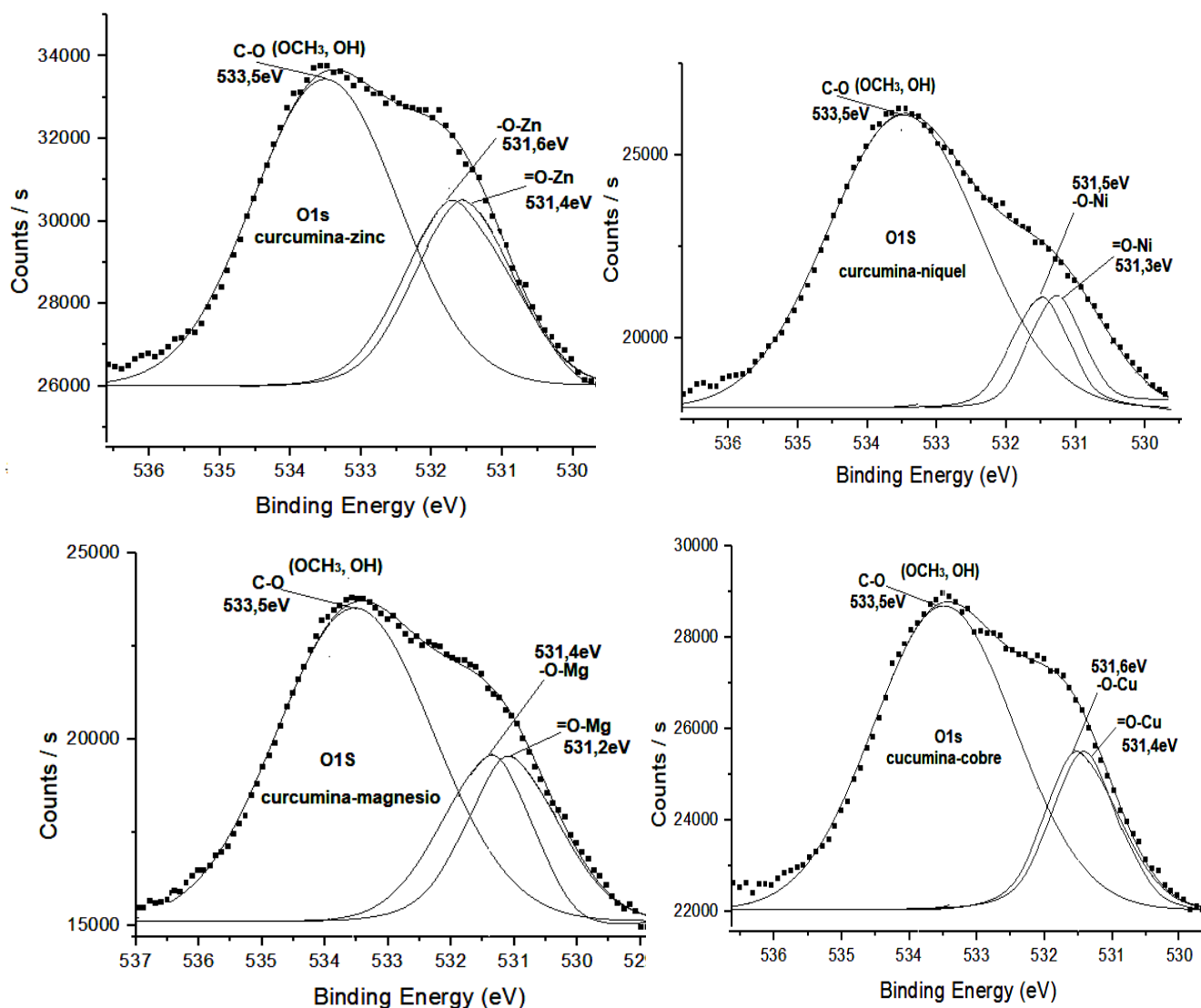


Figura 4. Espectro XPS O1s de los complejos

3.7 Ensayo de actividad antibacteriana de la curcumina y sus complejos de zinc, magnesio y cobre

Las actividades antibacterianas in vitro de la curcumina y sus complejos se estudiaron a través del método Kirby-Bauer (método de difusión en Agar) (Bauer *et al.*, 1966). La eficacia antimicrobiana se mide en función del crecimiento en mm de zonas de inhibición alrededor de cada pocillo, utilizando como blanco pocillos de 6mm, como control se utilizó el antibiótico gentamicina un poderoso agente antibacteriano.

Se prepararon diferentes concentraciones (100%, 75%, 50% y 25%) de curcumina para evaluar su actividad contra *Escherichia coli* (bacteria gramnegativa) con cepa tipo ATCC 25922 y *Staphylococcus aureus* (bacteria grampositiva) con cepa tipo ATCC 25923. Los resultados mostraron que la curcumina presenta actividad, frente a *Escherichia coli* a las concentraciones de 100% y 75%, los halos de crecimiento de inhibición fueron: 10mm, 100% y 9mm, 75%, no se observa actividad a 50% y 25%, porque los halos de inhibición se mantienen en 6mm, frente a *Staphylococcus aureus* la curcumina presenta actividad a las diferentes concentraciones, se observa un crecimiento en el diámetro del área de inhibición de 11mm, 100%; 10mm, 75%; 9mm, 50% y 8mm, 25%, estas propiedades antimicrobianas han sido observadas en otras investigaciones (García *et al.*, 2017).

Se prepararon complejos de curcumina con metales zinc, cobre y magnesio en DMSO a las mismas concentraciones de: 100%, 75%, 50% y 25% para evaluar la actividad antimicrobiana frente a las mismas cepas de bacterias. *Escherichia coli*, con cepa tipo ATCC 25922, *Staphylococcus aureus* con cepa tipo ATCC 25923, los resultados mostraron que los complejos metálicos de curcumina no presentan actividad frente a *Escherichia coli*. No existe formación de halo de inhibición en ninguna de las concentraciones, no hay variación del diámetro del pocillo de los complejos porque se mantiene en 6mm. Contra *Staphylococcus aureus* a las concentraciones de (100%, 75%, 50% y 25%), el complejo curcumina-cobre presenta actividad frente a *Staphylococcus aureus* a las concentraciones de: 8mm, 100%; 8mm, 75% y 7mm, 50% en comparación con la curcumina, a la concentración de 25% este complejo no presenta actividad no hay variación del halo de inhibición y se mantiene en 6mm. La actividad antibacteriana del complejo curcumina-magnesio, resultado positiva frente a *Staphylococcus aureus* a las concentraciones de: 9mm, 100%; 9mm, 75%; 8mm, 50% y 7mm, 25%, la actividad fue menor en comparación con la curcumina. El complejo curcumina-zinc mostró actividad frente a *Staphylococcus aureus* a las concentraciones de: 11mm, 100%; 10mm, 75%; 11mm, 50% y 10mm, 25% en comparación con la curcumina libre este complejo es mucho más eficaz al 50% y 25%, a las concentraciones de 100% y 75% prácticamente son similares, lo que demuestra que el complejo curcumina-zinc es mucho más eficaz a bajas concentraciones con relación a la curcumina.

3.8 Estudio computacional de la reactividad del ligando curcumina

Los cálculos se realizaron con el programa computacional Gaussian 09. Rev. A02, a nivel DFT, usando como función base 6-31G (d,p), juntamente con el funcional híbrido de correlación e intercambio B3LYP para optimización de la geometría molecular y la determinación de las energías moleculares, energías HOMO y LUMO, así como los descriptores de reactividad globales de dureza (η), blandura (σ), potencial químico electrónico (μ) y electrofilicidad (w).

En la determinación de los sitios con más probabilidad de reacción, se utilizó la función de Fukui que se calcularon a partir de las cargas Hirshfeld que se han usado con éxito para describir estas funciones condensadas (Ayers *et al.*, 2002) partiendo de las estructuras optimizadas anteriormente y usando la función base difusa 6-31G ++(d,p) con el funcional híbrido de correlación e intercambio B3LYP. Se puede observar que tanto en la forma ceto como en la forma enol los puntos de coordinación frente a iones metálicos se encuentra en los átomos de oxígeno según el análisis de FUKUI de ambas formas (Figura 5). Los valores en rojo muestran los átomos más susceptibles a sufrir un ataque electrofílico de los iones metálicos, es decir estos átomos tienen mayor probabilidad de unirse a los cationes metálicos (electrófilos).

Forma enólica: ($f^{+}_{\text{nucleofílica}}$ O1:0.318, O2: 0.184, O3: 0.481, O4:0.366, O5: 0.35, O6: 0.356) ($f^{-}_{\text{electrofilica}}$ O1:0.209, O2: 0.123, O3: 0.408, O4:0.349, O5: 0.36, O6: 0.364)

Forma cetónica: ($f^{+}_{\text{nucleofílica}}$ O1:0.069, O2: 0.075, O3: 0.024, O4:0.006, O5: 0.26, O6: 0.01) ($f^{-}_{\text{electrofilica}}$ O1:0.044, O2: 0.03, O3: 0.046, O4:0.02, O5: 0.066, O6: 0.033)

Sobre la estabilidad de los tautómeros termodinámicamente, podemos observar que la forma enólica ($E=-1263,5640\text{au}$) es ligeramente más estable que la forma cetónica ($E=-1263,5584\text{au}$). La dureza de la forma ceto es 1,815 eV y la dureza de la forma enol es 1,655 eV, lo que daría a entender que la forma ceto es menos reactiva que la forma enol.

4. CONCLUSIONES.

Se han preparado complejos de curcumina en la relación estequiométrica metal/ligando (1:2) *ML*₂, con los metales cobre(II), magnesio(II), zinc(II) y níquel(II). En estos complejos, la curcumina actúa en su forma enólica, la que se desprotona para unirse al ion metálico formando cada una un anillo quelato de 6 miembros a través de 2 oxígenos que provienen de la forma enólica.

De acuerdo con los resultados del estudio de resonancia magnética nuclear, se concluye que los complejos de níquel(II), zinc(II) y magnesio(II) son diamagnéticos. El complejo de níquel(II) es consistente con una estructura cuadrada plana de acuerdo con la Teoría del campo de los ligandos (Angulo-Cornejo & Beyer, 2010).

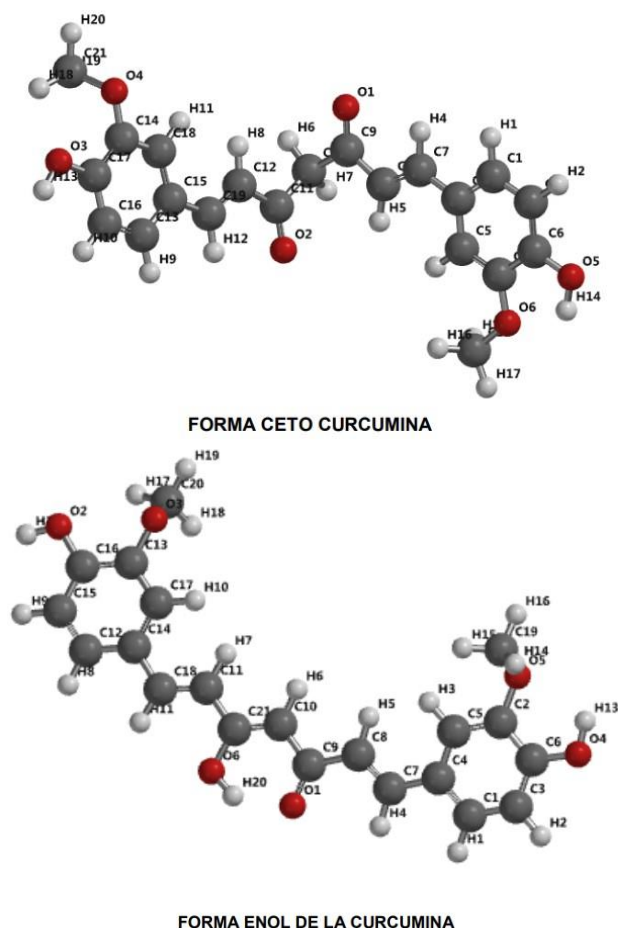


Figura 5. Átomos de la curcumina (color rojo) más susceptibles a sufrir un ataque electrofílico

La propuesta computacional del análisis de FUKUY, confirma los resultados experimentales, en el que se evidencia el ataque electrofílico de los iones metálicos a los dos oxígenos de cada curcuminato.

La actividad antimicrobiana de los complejos ha sido evaluada frente a bacterias *Escherichia coli* (bacteria gramnegativa) y *Staphylococcus aureus* (bacteria grampositiva), los resultados revelan que todos los complejos presentan actividad antibacteriana frente al *Staphylococcus aureus*. Se destaca el complejo de curcumina-zinc por presentar mayor actividad biológica frente a esta bacteria a bajas concentraciones (25 y 50%) comparado con los otros complejos y con la curcumina libre.

REFERENCIAS

- Angelice, R. (1979). Técnica y Síntesis en Química Inorgánica. (2da. Edición). Editorial. Reverté S.A. España. 139-145
- Angulo-Cornejo, J. (1986). Síntesis y caracterización del compuesto de coordinación del mercurio (II) y la curcumina (Tesis de Químico). Universidad Nacional Mayor de San Marcos
- Angulo-Cornejo, J., Lino-Pacheco, M., Richter, R., Hennig, L., Hallmaier, K., & Beyer, L. (2000). Metal chelates

of N-benzothiazol-2-yl, N-benzoxazol-2-yl and N-(1H-benzimidazol-2-yl)-benzamide. *Inorgánica Química Acta*, 305(1), 38-45.

[https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)00109-2)

Angulo-Cornejo, J., & Beyer L. (2010). Química de Coordinación. (Primera edición en español), Universidad Nacional de Ingeniería, Ediciones Universitarias, Lima Perú.

Ayers, W., & Parr, G. (2002). Variational Principles for Describing Chemical Reactions. Reactivity Indices Based on the External Potential. *Journal of the American Chemical Society*, 123(9), 2007-2017. <https://doi.org/10.1021/ja002966g>

Barik, A., Mishra, B., Kunwar, A., Kadam, M., Shen, L., Dutta, S., Padhye, S., Satpati, K., Zhang, Y., & Indira Priyadarsini, K. (2016). Comparative study of copper(II)-curcumin complexes as superoxide dismutase mimics and free radical scavengers. *European journal of medicinal chemistry*, 42(4), 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2006.11.012>

Bauer, W., Kirby, M., Sherris, C., & Turck, M. (1966). Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *American journal of clinical pathology*, 45(4), 493-496. https://doi.org/10.1093/ajcp/45.4_ts.493

Banerjee, S. & Chakravarty, R. (2015). Metal complexes of curcumin for cellular imaging, targeting, and photoinduced anticancer activity. *Accounts of chemical research*, 48(7), 2075-2083. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00127>

Chambridge Structural Data Base CSDB, (2021). Revisión realizada para curcumina y sus complejos de cobre, zinc, magnesio y níquel. Recuperado de la base de datos Chambridge Structural Data Base CSDB, versión 5.42.

Dulbecco, P., & Savarino, V. (2013). Therapeutic potential of curcumin in digestive diseases. *World journal of gastroenterology*, 19(48), 9256-9270. <https://doi.org/10.3748/wjg.v19.i48.9256>

García, L., Olaya, H., Sierra, V., Padilla, L. (2017). Actividad biológica de tres Curcuminoides de *Curcuma longa* L. (Cúrcuma) cultivada en el Quindío-Colombia. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 22(1). website: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962017000100007&lng=es&tlng=es.

González A., Marquet J., & Moreno-Mañas M. (1986). Metal complexes in organic synthesis. Preparation of α -(1-adamantyl)- β -dicarbonyl compounds and 4-(1-adamantyl)-3,5-disubstituted pyrazoles and isoxazoles. *Tetrahedron*, 42(15), 4253-4257. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)87650-X](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)87650-X)

González-Albadalejo, J., Sanz, D., Claramunt, R., Lavandera, J., Alkorta, I., & Elguero, J. (2015). Curcumin and curcuminoids: Chemistry, structural studies, and biological properties. *Anales de la real academia de farmacia* 81(4), 278-310. https://analesranf.com/wp-content/uploads/2015/81_04/an8104/81_04.html#p=6

- Grabner, S., & Modec, B. (2019). Zn(II) Curcumin Complexes with 2,2'-bipyridine and Carboxylates. *Molecules* (Basel, Switzerland), 24(14), 2540. <https://doi.org/10.3390/molecules24142540>
- Halevas, E., Pekou, A., Papi, R., Mavroidi, B., Hatzidimitriou, G., Zahariou, G., Litsardakis, G., Sagnou, M., Pelecanou, M., & Pantazaki, A. (2020). Synthesis, physicochemical characterization and biological properties of two novel Cu(II) complexes based on natural products curcumin and quercetin. *Journal of inorganic biochemistry*, 208, 111083. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2020.111083>
- Ismail, H., Sabry, Y., Mahdy, H., & Khalil, H. (2014). Synthesis and Characterization of some Ternary Metal Complexes of Curcumin with 1,10-phenanthroline and their Anticancer Applications. *Journal of Scientific Research*, 6(3), 509-519. <https://doi.org/10.3329/jsr.v6i3.18750>
- Jiang, T., Wang, L., Zhang, S., Sun, P., Ding, C., Chu, Y., & Zhou, P. (2011). Interaction of curcumin with Al(III) and its complex structures based on experiments and theoretical calculations. *Journal of Molecular Structure*, 1004, 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2011.07.059>
- Lino-Pacheco, M. (2022). Síntesis y caracterización de ligandos polidentados N, O y S dadores y sus complejos metálicos por modificación estructural en las periferias de las aciltioureas (Tesis de doctorado en Ciencias Químicas). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/18045>
- Moulder, F., Stickle, F., Sobol, M., & Bomben, D. (1992). Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy. Physical Electronics Division, Perkin-Elmer Corp. website: <https://www.hic.ch.ntu.edu.tw/PES/file/%E5%8F%83%E8%80%83%E8%B3%87%E6%96%99/XPS%20handbook.pdf>
- Nakamoto, N. (2006). Infrared Spectra and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. Sample Characterization and Spectral Data Processing Spectra-Structure Correlations. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/0470027320.s4104>
- Payton, F., Sandusky, P., & Alworth, W. (2007). NMR study of the solution structure of curcumin. *Journal of natural products*, 70(2), 143-146. <https://doi.org/10.1021/np060263s>
- Prasad, S., DuBourdieu, D., Srivastava, A., Kumar, P., & Lall, R. (2021). Metal-Curcumin Complexes in Therapeutics: An Approach to Enhance Pharmacological Effects of Curcumin. *International journal of molecular sciences*, 22(13), 7094. <https://doi.org/10.3390/ijms22137094>
- Sareen, R., Jain, N., & Dhar, K. (2016). Curcumin-Zn(II) complex for enhanced solubility and stability: an approach for improved delivery and pharmacodynamic effects. *Pharmaceutical development and technology*, 21(5), 630-635. <https://doi.org/10.3109/10837450.2015.1041042>
- Subhan, M., Alam, K., Rahaman, M., Rahman, M., & Awal, M. (2014). Synthesis and Characterization of Metal Complexes Containing Curcumin ($C_{21}H_{20}O_6$) and Study of their Anti-microbial Activities and DNA Binding Properties. *Journal of Scientific Research*. 6, 97-109. <http://dx.doi.org/10.3329/jsr.v6i1.15381>
- Zebib, B., Mouloungui, Z., & Noirot, V. (2010). Stabilization of curcumin by complexation with divalent cations in glycerol/water system. *Bioinorganic chemistry and applications*. <https://doi.org/10.1155/2010/292760>

BIOGRAFÍA



Jorge R. Angulo Cornejo, Profesor Principal Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Doctor en Ciencias Químicas por la Universidad Técnica Eslovaca en Bratislava. Estancias Posdoctorales en la Universidad de Leipzig Alemania. Químico por la UNMSM Lima Perú. Autor de 3 libros, Química de coordinación editorial EDUNI, Lima 2010; Ácidos y Bases, Fondo Editorial UNMSM Lima 2013; Koordinationschemie, Editorial Springer, Alemania 2012 y más de 90 publicaciones científicas en revistas y Congresos Científicos de la especialidad. Asesor de Tesis: 3 de Doctorados, 5 de Maestrías y 20 de pregrado. Línea de investigación, Síntesis Inorgánica, Química de coordinación, Química Supramolecular y Bioinorgánica.



Jenny M. Delgado Villanueva, Químico por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos Lima-Perú (2014), ha desempeñado cargos docentes, como Profesor Auxiliar en la Universidad Mayor de San Marcos y en la Universidad Tecnológica del Perú. Tiene estudios concluidos en la Maestría en Química en la Unidad de Posgrado de la UNMSM y está en proceso de graduación como Magister.

Determinantes del Uso de Efectivo en América Latina

Delgado, Olga¹ ; Barrera, Jorge^{2,*} 

¹Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador

²Escuela Superior Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador

Resumen: Este documento caracteriza el uso de efectivo en América Latina. Se utilizó la encuesta Global Findex, base de datos del Banco Mundial, para modelar la influencia de diversos factores en la probabilidad de uso de efectivo, mediante un modelo de regresión binaria. El principal hallazgo es que la población femenina, con educación básica, en condiciones de pobreza y desempleo es más propensa a utilizar efectivo en sus transacciones, es decir, que el grado educativo, el nivel de ingresos y el empleo formal influyen en el uso de efectivo.

Palabras clave: Dinero en efectivo, modelo Probit, Global Findex

Determinants of Cash Use in Latin America

Abstract: This document characterizes the use of cash in Latin America. We use the World Bank database, the Global Findex survey, to model the influence of various factors on the probability of the use of cash, through a binary regression model. The main finding is that the female population, with basic education, in conditions of poverty and unemployment, is more likely to use cash in their transactions, meaning that educational level, income level and formal employment influence the use of cash.

Keywords: Cash, Probit model, Global Findex

1. INTRODUCCIÓN

Los datos de Global Findex 2017 reflejan la continua evolución de la inclusión financiera, con información detallada sobre la manera en que los adultos en más de 140 economías acceden a las cuentas, realizan pagos, ahorran, piden préstamos y manejan el riesgo. Se ha tomado de base, con la finalidad de analizar cuáles son los determinantes del uso de efectivo en América Latina.

El efectivo en circulación es relativamente alto en la mayoría de los países de Latinoamérica y ha aumentado en algunos en los últimos años. El alto uso de efectivo, a su vez, va de la mano de un bajo número de pagos sin efectivo (Alfonso, Tombini, Zampolli, 2020). Algunos atributos propios como la facilidad de uso, la rapidez en la transaccionalidad, su bajo costo y el anonimato, podrían hacer que este medio de pago no pierda vigencia. Pese al incremento del uso de medios de pago electrónicos en los últimos años, el efectivo sigue siendo utilizado por la población en transacciones de bajo valor.

Si bien se tiene un creciente aumento de pagos digitales que sustituyen los pagos en dinero físico, sin embargo, existen factores idiosincráticos que explican la alta heterogeneidad de la demanda de circulante entre países. En economías

emergentes, el uso de medios de pago electrónicos es aún incipiente (Cabezas y Jara, 2021), de ahí la importancia del presente estudio que pretende identificar qué factores inciden en el uso de dinero en efectivo.

El uso de medios de pago electrónico por parte de los consumidores tiene implicaciones en la demanda y uso de efectivo. Además de utilizar la tarjeta de crédito como sustituto del efectivo, este instrumento tiene la facultad de poder extender la deuda en el tiempo y, a su vez, el peligro de hacerla revolvente.

Los sistemas de pago al por menor siguen siendo más rápidos y cómodos. Sin embargo, a pesar del aumento del uso de los pagos electrónicos en todo el mundo, apenas hay pruebas de que se esté abandonando el efectivo. Como el apetito por el efectivo sigue sin disminuir, pocas sociedades están cerca de ser "sin efectivo" o incluso "con menos efectivo". De hecho, la demanda de efectivo ha aumentado en la mayoría de las economías avanzadas desde el comienzo de la Gran Crisis Financiera. Este resurgimiento parece estar impulsado por motivos de almacenamiento de valor (que reflejan un menor costo de oportunidad de mantener el efectivo) más que por necesidades de pago (Bech, 2018).

*jbarrerav@yahoo.com

Recibido: 17/11/2021

Aceptado: 17/11/2022

Publicado en línea: 01/05/2023

10.33333/rp.vol51n2.07

CC 4.0

Los demandantes de efectivo pueden ser los consumidores que no tienen acceso a servicios financieros de la banca formal, como aquellos bancarizados. Por un lado, los consumidores no bancarizados, por su condición, se ven obligados a utilizar efectivo. Por otro lado, la población bancarizada también utiliza dinero en efectivo en sus pagos. Pese a tener a su alcance una cuenta bancaria y una tarjeta de débito o de crédito, en transacciones de bajo valor también puede preferir el dinero físico. En esta línea, la frecuencia de uso del efectivo, expresada tanto en número de pagos como en valor, domina a la frecuencia de uso de medios de pago electrónico. Las tendencias de desigualdad han sido diversas en Latinoamérica, algunos países han experimentado una disminución de la desigualdad, pero aún prevalecen inequidades (Dabla-Norris, Kochhar, Ricka, Suphaphiohat, y Tsounta, 2015).

Para conocer cuáles son los factores que determinan el uso del efectivo en Latinoamérica, se utilizó la encuesta efectuada por el Banco Mundial en 2017, las preguntas del cuestionario del Global Findex son cerradas y sujetas a una sola respuesta, por esta razón se optó por un modelo probit para determinar la influencia de las variables en el uso de efectivo.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, revisamos la literatura relacionada sobre la demanda de efectivo. En la Sección 3, describimos los datos y la encuesta, en la que se desarrolla un análisis de clúster con el fin de determinar si existe homogeneidad en los datos analizados. En la Sección 4, desarrollamos un modelo que analiza las variables que inciden en el uso de efectivo. En la Sección 5, presentamos los datos y en la Sección 6, concluimos y discutimos las implicaciones de los resultados.

2. LITERATURA RELACIONADA

De acuerdo con Baumol (1952), cuanto menor es el costo de un retiro de efectivo, mayor es la tenencia de efectivo en particulares; adicionalmente, el costo de uso del efectivo se reduce con respecto a los instrumentos de pago alternativos, lo que tiende a aumentar a su vez el uso del efectivo (Whitesell, 1989).

La preferencia por la liquidez va estrechamente unida a la incertidumbre y a la falta de confianza. Siempre que el estado de confianza cae, la preferencia por la liquidez es mayor (Keynes, 1970).

La demanda de dinero está motivada por la necesidad de facilitar las transacciones diarias de los consumidores, de acuerdo con Baumol (1952) y Tobin (1956). De ahí, se supone que un individuo recibe su dinero al inicio de cada período en una cuenta bancaria y posteriormente se dispone a movilizar una parte de ese dinero de acuerdo con las opciones que tenga disponible, y el saldo restante que mantiene en su cuenta bancaria.

De otro lado, en el pasado, el dinero en efectivo se utilizaba para prácticamente todo tipo de pagos y circulaban billetes de hasta de 500 a 10 000 dólares, según Humphrey (2003). En la actualidad, el uso de efectivo en EE.UU. -excluyendo las

actividades ilegales y en el extranjero- se limita casi exclusivamente a las transacciones minoristas en el punto de venta.

Briglevics y Schuh (2014) estimaron la demanda de efectivo de los consumidores estadounidenses con microdatos de panel para 2008-2010 extendiendo el modelo Baumol-Tobin para permitir pagos con tarjeta de crédito y deuda renovable. En un mercado postcrisis con tasas de interés cercanas a cero, la demanda de efectivo por parte de los consumidores que usan tarjetas de crédito por conveniencia tiene la misma elasticidad de interés negativa pequeña que se estimó en períodos anteriores. No obstante, la demanda de efectivo por parte de los consumidores que utilizan tarjetas de crédito para pedir prestado es inelástica a los intereses. De acuerdo con los autores, estos resultados podrían tener implicaciones a futuro debido a que la cantidad de consumidores que renueva la deuda de sus tarjetas de crédito tiene menos probabilidad de cambiar de efectivo a crédito.

El análisis del Banco de Pagos Internacionales (BIS por sus siglas en inglés) (2018), indica que la demanda de efectivo permanece robusta en el mundo, a excepción de algunos países nórdicos. Aunque se esperaría que la demanda de efectivo sea más alta en las economías emergentes, los datos del último libro rojo revelaron que existen diferencias entre países, incluso pertenecientes a la misma región. Por ejemplo, en Japón las especies monetarias en circulación representaron el 20% del PIB en 2016, mientras que en Suecia fueron de apenas 2%. El análisis concluyó que la preferencia creciente por efectivo está determinada, al menos en parte, por las bajas tasas de interés que acompañaron a las economías luego de la crisis financiera global, brindando un bajo costo de oportunidad para las tenencias de efectivo y por motivos de almacenamiento de valor, más que por su función de pago.

Amromin y Chakravorti (2007) utilizaron técnicas de estimación de panel para analizar el cambio en la demanda transaccional de efectivo resultante de un mayor uso de tarjetas de débito en 13 países de 1988 a 2003. Los autores separaron ambas funciones, encontrando que la demanda de billetes y monedas de baja denominación disminuye a medida que aumenta el uso de tarjetas de débito porque los comerciantes necesitan hacer menos cambios para las compras de los clientes.

De acuerdo con la información de la Encuesta de consumidores y servicios financieros móviles de los Estados Unidos (2012), entre las barreras para acceder a una cuenta bancaria, 24% de los hogares estadounidenses señala que no le agrada tratar con los bancos, 24% indica que no realiza pagos con la frecuencia necesaria para tener una cuenta bancaria, 13% manifiesta que los cargos por los servicios son demasiado altos, 10% señala que ningún banco les abrirá una cuenta, entre otras razones (18%). Además, la población no bancarizada tiende a percibir menores ingresos que aquellos consumidores totalmente bancarizados y es, generalmente, más joven, de sexo femenino, de estado civil soltero, menos educada, sin un empleo formal y evita contraer riesgos

financieros (Gross, Matthew B., Hogarth, Jeanne M. and Schmeiser, Maximilian, 2012).

Así lo confirma una encuesta efectuada por el Banco Central Europeo (ECB, por sus siglas en inglés) (2017). Los resultados determinaron que, en los hogares de los 19 países que componen el área euro, el efectivo fue utilizado mayormente en transacciones de bajo valor, aunque existen diferencias individuales entre naciones. Su frecuencia de uso fue superior en más de cuatro veces a la de tarjetas de débito o crédito, dado que, del total de pagos en POS, alrededor del 79% se efectuó en efectivo, 19% con tarjeta y 2% mediante otros instrumentos de pago. Asimismo, la encuesta reveló que el valor total de pagos en efectivo realizados por los hogares fue superior al de pagos con tarjeta, 54% frente a 39%, y con otros instrumentos el 7% restante.

Kombe, Yabu, Mwita y Mbiha (2020), en su estudio, demuestran que las transacciones por teléfono móvil han ganado progresivamente en Tanzania en los últimos años y es ahora el método de pago más utilizado después del efectivo. Adicionalmente, indican que, a pesar de esta evolución, la demanda de tenencia de efectivo (moneda en circulación) ha permanecido inalterada.

Mukhopadhyay (2016) presentan un modelo teórico de las decisiones de pago de consumidores y vendedores. Estas decisiones están influidas por la comodidad de las transacciones sin efectivo y la tentación de evadir impuestos. Dado que la economía sin dinero en efectivo implica efectos de red, se identifican ciertos facilitadores. Algunas de las principales estimaciones son:

- a) Una proporción significativamente mayor de individuos realiza pagos sin efectivo ahora (12,61% en 2014 frente al 3,47% en 2011);
- b) el número y el valor monetario de las transacciones sin efectivo tienen una CAGR (tasa de crecimiento anual compuesto) de 19,91% y 24,14%, respectivamente;
- c) la mayor parte del crecimiento de los pagos sin efectivo se ha producido a través de los pagos móviles.

Alfonso, Tombini y Zampolli (2020), en su documento publicado por el BIS, indican que existen problemas de acceso en los pagos en efectivo y sin efectivo en América Latina y el Caribe (ALC), el efectivo en circulación es relativamente alto en la mayoría de los países de la región y ha aumentado en algunos en los últimos años, aunque parte del aumento puede deberse a motivos de almacenamiento de valor (Bech et al (2018)). El elevado uso de efectivo, a su vez, va de la mano con un bajo número de pagos sin efectivo; en promedio, los habitantes de los países de ALC realizan 50 pagos sin efectivo al año, lo que es nueve veces menor que en las economías avanzadas y casi una cuarta parte menos que en otras Economías de Mercado Emergentes.

Por tal sentido, resulta interesante realizar el estudio para identificar cuáles son los determinantes del uso de efectivo basado en la encuesta realizada por el Banco Mundial en el año 2017.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS Y DE LA ENCUESTA

La información utilizada para este análisis proviene de las encuestas de la base de datos del Global Findex del año 2017, última disponible. Los países analizados son 20, que componen América Latina. Adicionalmente, con el fin de explicar el entorno se han tomado las Estadísticas del Libro Amarillo y del Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE).

De acuerdo con los datos del CELADE, en el año 2017 la población de América Latina fue de 624 millones de habitantes, de los cuales 307 millones son hombres y 317 millones son mujeres; la población urbana fue de aproximadamente de 503 millones y la rural de aproximadamente de 121 millones de habitantes. Es de indicar que el 50,4% tiene menos de 30 años y el promedio de años de estudio en la región es de 10 años para la población entre 15 y 24 años, estos datos se muestran en la Tabla 1.

La Tabla 2 muestra los Indicadores Monetarios de los países que se encuentran en la región en los que se puede destacar que las naciones que tienen más dinero en efectivo en circulación respecto al PIB son: Saint Kitts y Nevis, Dominica, Barbados, Brasil, Bolivia, Antigua y Barbuda.

Adicionalmente, en el Anexo 1 se puede evidenciar los países que disponen mayormente de medios de pago electrónicos disponibles, entre los que se puede destacar a Chile, Venezuela, Trinidad y Tobago, y Uruguay.

La Tabla 3 compendia las frecuencias de la variable dependiente. De un total de 19 030 individuos encuestados en 20 países, 9 162 respondieron no tener una cuenta bancaria formal, es decir, 48% de la muestra estaría obligada a utilizar efectivo por no encontrarse bancarizada.

La Tabla 4 condensa la estadística descriptiva sobre las variables independientes por categorías. La edad promedio de los encuestados es de 42 años, aumenta a 43 en el grupo bancarizado y disminuye a 41 en el que no lo es, aunque la desviación estándar es superior en este último. En cuestión de género, la estadística promedio señala que el número de mujeres es superior al de hombres en el grupo que utiliza más efectivo. La población no bancarizada registra, en promedio, educación primaria en mayor proporción que la población bancarizada; lo contrario sucede con la educación secundaria, cuya media es mayor en aquellas personas que poseen una cuenta bancaria. Los quintiles más pobres de la muestra también se vinculan con el uso de efectivo, mientras que los quintiles de mayores ingresos utilizan otros medios de pago. Por último, la estadística marca que el trabajo formal es una característica prominente en el grupo que utiliza menos efectivo.

Tabla 1 Población

Año - 2017	
Población Total	624,07
Hombres	307,13
Mujeres	316,94
Urbano	503,12
Rural	244,70

Cifras en millones

Fuente: CELADE

Tabla 2. Indicadores Monetarios

País	Masa Monetaria (M1) (% del PIB)	Liquidez monetaria (M2)	PIB por habitante*
Saint Kitts y Nevis	127,38%	2 082	19 155,4
Dominica	124,77%	1 604	7 274,7
Barbados	113,78%		17 392,0
Brasil	93,06%	1 943 770	9 928,7
Bolivia	92,53%	182 524	3 351,1
Antigua y Barbuda	91,29%	3 053	15 383,4
Granada	82,73%	2 057	10 152,8
Belice	79,66%		4 887,6
Chile	78,72%	123 903 043	14 999,4
San Vicente y las Gran.	72,02%	1 462	7 213,0
Santa Lucía	68,95%	2 812	11 047,5
Trinidad y Tabago	67,51%	86 755	16 173,6
Suriname	65,45%	6 375	5 637,6
Honduras	58,62%	238 495	2 453,7
Bahamas	56,27%	6 763	32 719,2
El Salvador	53,84%	12 449	3 910,3
Jamaica	52,39%	457 899	5 069,2
Guatemala	50,80%	209 575	4 233,6
Colombia	49,02%	437 122 975	6 376,7
Perú	47,58%	191 499	6 710,5
Guyana	47,29%		6 124,9
Costa Rica	46,58%	10 955 742	11 814,6
Uruguay	44,81%	86 755	17 322,2
Paraguay	42,81%	46 864 297	5 680,6
Nicaragua	42,02%	36 193	2 159,2
México	38,48%	5 328 907	9 287,8
Ecuador	37,15%	48 920	6 213,5
Rep. Dominicana	34,56%	1 021 467	7 609,4
Argentina	28,43%	2 461 045	14 648,8
Haití	28,28%	131 380	1 311,6
Cuba		...	8 541,2
Panamá		40 029	15 150,4
Venezuela		1,270	...
América Latina y El Caribe			8 833,4
América Latina			8 822,6
El Caribe			9 755,8

*Precios corrientes en dólares

Fuente: CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) Información revisada al 28/ABR/2021 en <http://www.cepal.org>
 Fondo Monetario Internacional, Estadísticas financieras internacionales y archivos de datos y estimaciones del PIB del Banco Mundial y la OCDE en <https://datos.bancomundial.org>.

Tabla 3. Frecuencias de la variable dependiente

Valor	Número	Porcentaje
Uso de efectivo (Y= 0)	9 868	51,85
No uso de efectivo (Y= 1)	9 162	48,15
Total	19 030	100,00

Fuente: Global Findex

Tabla 4. Estadística descriptiva de variables independientes por categorías

Variable	Media			Desviación estándar		
	Uso	No uso	Total	Uso	No uso	Total
Constante	1	1	1	0	0	0
Género	0,5634	0,6429	0,6017	0,4960	0,4792	0,4896
Edad	42,88	40,93	41,94	17,62	19,05	18,35
Edad^2	2 149,4	2 038,2	2 095,9	1 696,8	1 765,1	1 730,9
Educ. primaria	0,2980	0,4715	0,3816	0,4574	0,4992	0,4858
Educ. secundaria	0,5467	0,4824	0,5158	0,4978	0,4997	0,4998
Ingreso 1°Q	0,1270	0,2413	0,1820	0,3330	0,4279	0,3859
Ingreso 2°Q	0,1505	0,2149	0,1815	0,3576	0,4108	0,3854
Ingreso 3°Q	0,1865	0,2042	0,1950	0,3895	0,4031	0,3962
Ingreso 4°Q	0,2248	0,1888	0,2075	0,4175	0,3914	0,4055
Empleo	0,7218	0,5875	0,6572	0,4481	0,4923	0,4747

Fuente: Global Findex

4. MARCO METODOLÓGICO

En la resolución de problemas y en la toma de decisiones, el primer paso es precisamente clasificar la situación, de tal manera que se pueda aplicar la metodología conveniente, misma que dependerá de esa clasificación. Para conocer cuáles son los factores que determinan el uso del efectivo en Latinoamérica, se utilizó la encuesta efectuada por el Banco Mundial en 2017. Las preguntas del cuestionario del Global Findex son cerradas y sujetas a una sola respuesta. Por ello, se optó por la regresión de elección binaria para modelar cómo influye la presencia de diversos factores en la probabilidad de aparición de un suceso, generalmente dicotómico.

4.1. Especificación del modelo

Los modelos de probabilidad exploran la relación entre una variable binaria y otras de naturaleza continua y/o binaria. Estas técnicas de clasificación permiten observar si prevalecen diferencias significativas entre grupos de individuos con respecto a un conjunto de características medidas sobre los mismos. De existir estas diferencias, es posible clasificar o asignar de forma sistemática nuevos individuos de origen desconocido a grupos previamente reconocidos o definidos.

$$Prob(\text{evento } j \text{ ocurra}) = Prob(Y = j) = F[\text{efectos, parámetros}] \quad (1)$$

La variable dependiente, Y , representa la ocurrencia de un evento o la elección entre dos alternativas. En el cuestionario del Global Findex de 2017, la primera pregunta consulta al encuestado si tiene actualmente una cuenta en un banco o en otro tipo de institución financiera formal, pudiendo responder sí o no. Un individuo que no dispone de cuenta bancaria por distintas razones está limitado al uso de dinero en efectivo para sus transacciones, por lo que, para nuestro análisis, la variable dependiente identifica la utilización de efectivo ($Y = 1$) o no ($Y = 0$).

En nuestro modelo, asumimos que una serie de factores, como: la edad, el sexo, la educación, el nivel de ingresos y la ocupación, representados en el vector x , explica la utilización de efectivo, de tal manera que la probabilidad de éxito en el modelo se evalúa en la función $Prob(Y = 1|x) = F(x, \beta)$, y la probabilidad de fracaso $Prob(Y = 0|x) = 1 - F(x, \beta)$.

La serie de parámetros β refleja el impacto de los cambios de x en la probabilidad. El problema es utilizar un modelo adecuado para la parte derecha de la ecuación anterior. Siguiendo a Greene (2003), una posibilidad es utilizar la regresión lineal $F(x, \beta) = x'\beta$. Dado que $E[y|x] = F(x, \beta)$, se puede construir el modelo de regresión:

$$y = E[y|x] + (y - E[y|x]) = x'\beta + \varepsilon \quad (2)$$

Este modelo de probabilidad lineal simple de Y sobre x tiene algunos inconvenientes. La perturbación aleatoria ε es heteroscedástica en la medida en que depende de β . Dado que $x'\beta + \varepsilon$ tiene que pertenecer al intervalo $[0, 1]$, ε sería igual a $-x'\beta$ o $1 - x'\beta$, con probabilidades $1 - F$ y F , respectivamente. Entonces, se puede demostrar que:

$$Var[\varepsilon|x] = x'\beta(1 - x'\beta) \quad (3)$$

Sobre esta base, no se puede construir un modelo $x'\beta$ porque las probabilidades estimadas podrían tomar valores fuera del intervalo $[0, 1]$ y las varianzas podrían ser negativas. Además, la perturbación aleatoria puede no seguir una distribución normal y el coeficiente de determinación R^2 estaría subestimado. Nuestra necesidad es un modelo que produzca predicciones consistentes con la teoría de la primera ecuación. Para un regresor dado, esperaríamos que:

$$\lim_{x'\beta \rightarrow +\infty} Prob(Y = 1|x) = 1 \\ \lim_{x'\beta \rightarrow -\infty} Prob(Y = 1|x) = 0 \quad (4)$$

El modelo Probit cumple el requerimiento anterior, dado que utiliza una función de distribución acumulada normal estándar $\Phi(\cdot)$ que asume valores entre 0 y 1:

$$Prob(Y = 1|x) = \int_{-\infty}^{x'\beta} \Phi(t)dt = 1 - \Phi(-x'\beta) = \Phi(x'\beta) \quad (5)$$

Aplicado a nuestro análisis, el modelo se especifica como:

$$Prob(Y = 1|x) = \Phi(x'\beta) \\ = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 Edad + \beta_3 Educ + \beta_4 I \\ + \beta_5 O + \varepsilon \quad (6)$$

donde, Y corresponde al uso de efectivo. Se asigna el valor de 1 cuando el encuestado responde que no posee cuenta bancaria.

El vector x está dado por las siguientes variables independientes, comunes para evaluar la variable dependiente:

- G corresponde a la variable binaria que identifica el sexo del encuestado ($Y = 1$ si $x_i = mujer$).
- $Edad$ es una variable continua que presenta la edad del encuestado, en años. Se incluyó esta variable al cuadrado en caso de que exista una relación no lineal.
- $Educ$ es una variable binaria que identifica si el encuestado posee el nivel de educación especificado ($Y = 1$ si $x_i = posee educación$) o no. La categoría de

referencia que se excluye del modelo corresponde a educación primaria o sin educación.

- I es una variable binaria que refiere si el encuestado posee el nivel de ingresos determinado ($Y = 1$ si $x_i = pertenece al quintil j de ingresos$) o no. El quintil de mayores ingresos es la variable *dummy* omitida.
- O es una variable binaria que registra si el encuestado está trabajando actualmente ($Y = 1$ si $x_i = empleo formal$) o no.

Finalmente, el modelo de probabilidad es una regresión:

$$E[y|x] = 0[1 - F(x'\beta)] + 1[F(x'\beta)] = F(x'\beta) = \Phi(x'\beta) \quad (7)$$

de la cual, de manera habitual, mediante la primera derivada se pueden calcular los efectos marginales en la variable dependiente:

$$\frac{\partial E[y|x]}{\partial x} = \left\{ \frac{dF(x'\beta)}{d(x'\beta)} \right\} \beta = f(x'\beta)\beta = \Phi(x'\beta)\beta \quad (8)$$

La dirección del efecto de un cambio en x depende únicamente del signo del coeficiente β . Valores positivos de β implican que un crecimiento de x aumentará la probabilidad de respuesta, valores negativos implican lo contrario. Sin embargo, dado que se trata de un modelo de selección binaria, el factor x puede incluir variables dicotómicas y la interpretación del valor de los coeficientes resulta complicado. En virtud de que los coeficientes estimados desde un modelo binario no pueden ser interpretados como el efecto marginal en la variable dependiente, los efectos marginales apropiados para una variable independiente binaria d serían:

$$Efecto\ marginal = Prob[Y = 1|\bar{x}_{(d)}, d = 1] \\ - Prob[Y = 1|\bar{x}_{(d)}, d = 0] \quad (9)$$

donde $\bar{x}_{(d)}$ corresponde a las medias de todas las otras variables del modelo. El calcular la derivada respecto a la variable binaria como si fuera continua provee una aproximación bastante certera. Con esta especificación del modelo, podemos calcular los regresores β utilizando el método de máxima verosimilitud o de densidad conjunta de los residuos del modelo estimado.

$$l(\beta) = \sum_{i=0}^n y_i \log(1 - F(x'_i\beta)) + (1 - y_i) \log(F(x'_i\beta)) \quad (10)$$

El valor de la función objetivo en el máximo se obtiene al extraer el logaritmo en la función de verosimilitud, cuya ventaja es que este valor no se ve influido por las transformaciones que pudiera haberse sometido la variable endógena.

4.2. Construcción de escenarios

A partir de la metodología probit especificada, se construyen modelos de análisis de escenarios, sensibilidad y simulación para analizar cada variable explicativa y cuantificar e interpretar cómo una variación afecta la probabilidad de uso de efectivo estimada. Específicamente, se simuló cuatro

escenarios como función de la edad para analizar cómo la probabilidad de uso de efectivo estimada varía con cada una de las categorías de i) género, ii) empleo, iii) educación e iv) ingreso, asignando el valor promedio a las demás variables explicativas que no intervienen directamente.

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los determinantes del uso de efectivo en América Latina. La Tabla 5 muestra los parámetros de la estimación del modelo de regresión binaria para el uso de efectivo en Latinoamérica. Observamos que existe una relación significativa, con un nivel de confianza del 99%, entre todos los regresores utilizados y la variable dependiente.

Tabla 5. Especificación del modelo Probit

Variable	Coefficiente (Error Estándar)	Efecto marginal
C	1,199869 (0,078697)*	
Género	0,080434 (0,020585)*	0,032023
Edad	-0,029666 (0,002778)*	-0,011811
Edad ²	0,000262 (2,97E-05)*	0,000104
Educación secundaria	-0,353270 (0,023535)*	-0,140647
Educación universitaria	-0,909122 (0,040798)*	-0,361948
Ingreso 1°Q	0,661716 (0,032394)*	0,263448
Ingreso 2°Q	0,527237 (0,031630)*	0,209908
Ingreso 3°Q	0,387884 (0,030538)*	0,154428
Ingreso 4°Q	0,265345 (0,029786)*	0,105641
Empleo	-0,290827 (0,022507)*	-0,115786

Así mismo, se incluye el efecto marginal que representa el cambio en la probabilidad ante la variación de una unidad en la variable explicativa. El hecho de ser mujer incrementa la probabilidad de uso de efectivo en 3,2%, mientras que la condición de estar empleado la disminuye en 11,6%. El nivel educativo refleja una relación inversa con el indicador de utilización de dinero físico. El nivel educativo es una variable significativa en el modelo. Respecto a la educación primaria o menor, tanto la educación secundaria como la universitaria se asocia negativamente con el uso de efectivo, es decir, la población sería menos propensa a utilizar efectivo conforme aumenta su educación. Al contrario, respecto a la población de mayores ingresos, la renta percibida corresponde positivamente con la variable sujeto de análisis, los efectos marginales son superiores para los quintiles que representan menores ingresos y van disminuyendo conforme los márgenes aumentan.

La edad se asocia de forma no lineal con el uso de efectivo dado que el efecto marginal para $Edad^2$ es positivo, aunque existe una relación lineal inversa entre $Edad$ y la variable dependiente. Esto se explicaría en virtud de que los jóvenes mientras se educan, no suelen percibir ingresos ni pertenecer al mundo laboral, por lo que tienden a utilizar efectivo. Conforme la edad avanza, empiezan a manejar otros medios de pago, por lo que el uso de efectivo será cada vez menor. Una vez que concluye la vida laboral, los adultos mayores suelen utilizar nuevamente efectivo, en lugar de otros medios de pago.

Desde esta óptica, encontramos que la población femenina latinoamericana, sin educación, en condiciones de pobreza y que se encuentra desempleada, es más propensa a utilizar efectivo en sus transacciones. El cálculo de los efectos marginales permite identificar al grado educativo, al nivel de ingresos y al empleo como las características que explican en mayor medida el uso de dinero físico, mientras que la edad y el género no son los principales determinantes.

Al incluir en el modelo variables dicotómicas por país, se observa que las estimaciones son estadísticamente significativas para 17 de las 19 naciones latinoamericanas estudiadas, con un nivel de confianza del 99%. Los determinantes del uso de efectivo, entonces, se cumplen en todas las economías presentadas en la Tabla 6 a excepción de Haití y El Salvador (Nicaragua resulta significativo con un nivel de confianza de 90%). El hecho de ser originario de Trinidad y Tobago, Venezuela, Brasil, Chile, Costa Rica y Uruguay hace que disminuya en mayor proporción la probabilidad de uso de efectivo, es decir, son las naciones menos propensas a utilizar efectivo; mientras que en Nicaragua, Perú, Panamá, Colombia, Guatemala y Ecuador los efectos en la probabilidad estimada son menores.

La Tabla 7 recopila los criterios de información estadística del modelo de regresión binaria especificado.

La media de la variable dependiente es 0,48 con una desviación estándar de 0,50. El error estándar de la regresión y la suma de los residuos al cuadrado permiten calcular la función de máxima verosimilitud y sus estadísticos. Los criterios de información de Akaike, Schwarz y Hannan-Quinn indican que el modelo utilizado es consistente, por lo que es válido en la predicción de los valores de las variables endógenas. El valor crítico del estadístico LR es cercano a 0, con un nivel de confianza del 95%, lo que permite rechazar la hipótesis nula conjunta de que todos los coeficientes son cero.

La Tabla 8 resume las pruebas de bondad de ajuste de Andrews y de Hosmer-Lemeshow por cada uno de los quintiles de riesgo. Los resultados de ambas pruebas proporcionan evidencia de que el modelo es estadísticamente significativo y sólido para explicar la relación entre las variables independientes y la variable dependiente, puesto que los valores críticos son cercanos a 0 con un nivel de significancia del 95%.

Tabla 6. Especificación del modelo Probit por país

Variable	Coefficiente (Error Estándar)	Efecto marginal	Probabilidad
ARG	-0,502732 (0,058716)*	-0,200152	0,0000*
BOL	-0,530771 (0,059278)*	-0,211315	0,0000*
BRA	-1,071417 (0,060809)*	-0,426562	0,0000*
CHL	-0,976397 (0,059941)*	-0,388732	0,0000*
COL	-0,293070 (0,059182)*	-0,116680	0,0000*
CRI	-0,919384 (0,060334)*	-0,366033	0,0000*
DOM	-0,646082 (0,059346)*	-0,257224	0,0000*
ECU	-0,455540 (0,059221)*	-0,181364	0,0000*
GTM	-0,375412 (0,059709)*	-0,149462	0,0000*
HND	-0,469458 (0,059682)*	-0,186905	0,0000*
HTI	-0,011876 (0,074015)	-0,004728	0,8725
NIC	0,117623 (0,060578)**	0,046829	0,0522**
PAN	-0,285031 (0,059103)*	-0,113479	0,0000*
PRY	-0,474365 (0,058855)*	-0,188858	0,0000*
PER	-0,184568 (0,059265)*	-0,073482	0,0018*
SLV	0,040715 (0,060689)	0,016210	0,5023
TTO	-1,323184 (0,079299)*	-0,526798	0,0000*
URY	-0,708862 (0,059786)*	-0,282218	0,0000*
VEN	-1,100280 (0,062277)*	-0,438053	0,0000*

*Nivel de significancia al 1%

**Nivel de significancia al 10%

Tabla 7. Criterios de información estadística

Criterio	Valor
McFadden R-cuadrado	0,137473
Media variable dependiente	0,481450
D.E. variable dependiente	0,499669
Suma de residuos al cuadrado	3 918,37
S.E. de la regresión	0,454126
Información de Akaike	1,197682
Criterio Schwarz	1,210063
Criterio Hannan-Quinn	1,201742
Log likelihood	-11 365,94
Restr. log likelihood	-13 177,49
Avg. log likelihood	-0,597264
Desviación	22 731,88
Restr. desviación	26 354,98
Estadístico LR	3 623,10
Prob. (Estadístico LR)	0,000000

Fuente: Autores

Tabla 8. Prueba de bondad de ajuste de Andrews y Hosmer-Lemeshow

	Quintil de riesgo		Dep=0		Dep=1		H-L
	Bajo	Alto	Actual	Esperado	Actual	Esperado	
1	0,0154	0,1879	1 693	1 670,37	210	232,63	1 903
2	0,1879	0,2814	1 450	1 451,22	453	451,78	1 903
3	0,2814	0,3560	1 311	1 295,05	592	607,95	1 903
4	0,3560	0,4259	1 129	1 158,32	774	744,68	1 903
5	0,4259	0,4895	1 017	1 031,82	886	871,18	1 903
6	0,4895	0,5514	895	912,28	1 008	990,72	1 903
7	0,5514	0,6121	796	796,72	1 107	1 106,28	1 903
8	0,6121	0,6800	651	673,50	1 252	1 229,50	1 903
9	0,6800	0,7584	558	538,82	1 345	1 364,18	1 903
10	0,7586	0,9529	368	345,97	1 535	1 557,03	1 903
Total			9 868	9 874,06	9 162	9 155,94	19 030

Estadístico H-L 9,9474 Prob. Chi-Sq(8) 0,0173

Estadístico Andrews 12,0966 Prob. Chi-Sq(10) 0,0149

Fuente: Autores

5.1. Backtesting

El modelo Probit también puede ser contrastado contra sí mismo, igual que la regresión lineal múltiple, ignorando momentáneamente la clasificación original de los individuos y aplicando la ecuación sobre ellos. Entonces, su finalidad es, por un lado, explicar la presencia de un patrón que podría identificar a un grupo en función de las variables de su perfil y cuantificar el peso de cada una de ellas en la clasificación; y, por otro lado, predecir a qué grupo habrá de pertenecer un nuevo individuo sobre la base de su perfil de variables.

La interpretación del resultado de aplicar un modelo Probit es más intuitiva que otras técnicas de clasificación al tratarse de un valor de probabilidad. La Figura 1 muestra la distribución de frecuencias de la probabilidad de éxito estimada que identifica la utilización de efectivo, segmentada por las variables explicativas categóricas. Las representaciones gráficas reafirman los resultados obtenidos por el modelo, observando que la probabilidad de utilizar efectivo de acuerdo con las características individuales de los encuestados, tiende a ser superior en el conjunto de mujeres, en el grupo que registra educación primaria, en el quintil que percibe menores ingresos y en la proporción de individuos que no se encuentran empleados adecuadamente. Además, gráficamente se observa que la probabilidad de uso de efectivo es menor conforme aumentan tanto el nivel educativo como la renta percibida.

Los resultados anteriores se confirman también por país, con algunas particularidades. La Figura 2 grafica la distribución de frecuencias de la probabilidad de éxito estimada por país. En cuestión de género, se esperaría una tendencia mucho más marcada en el uso de efectivo por parte de las mujeres en Ecuador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Perú, Paraguay y El Salvador, respecto a la tendencia que registrarían los hombres, cuya distribución guarda mayor simetría.

En cuanto al grado académico, las distribuciones de probabilidad repartidas por educación primaria y secundaria empiezan a distanciarse en países como Chile, Colombia y Uruguay donde el nivel de estudios sería más relevante para identificar la propensión al uso de efectivo. La educación de

tercer nivel en todos los países está relacionada directamente con una menor probabilidad de uso de efectivo.

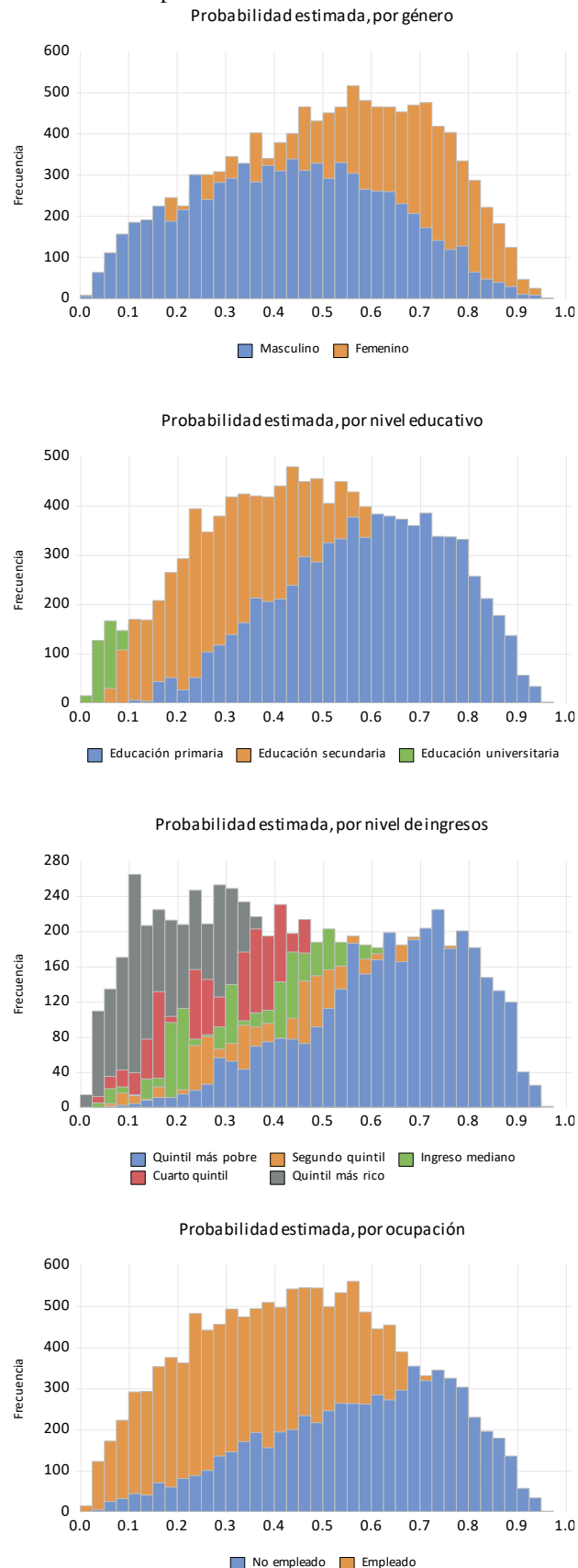


Figura 1. Distribución de frecuencias de la probabilidad estimada, por variable categórica

En lo que respecta al nivel de ingresos, los resultados agrupados por quintiles guardan en general la misma relación en todos los países analizados, se evidencia una mayor concentración del quintil más pobre hacia la derecha, asociado a una mayor probabilidad estimada, y del quintil más rico hacia la izquierda, lo que significa una menor probabilidad. Por último, el empleo formal tiende a ubicarse hacia la izquierda de la distribución de probabilidad en todos los países, se asocia a un menor uso de efectivo, con mayor incidencia en el caso de Argentina, Chile, Haití, Perú, Venezuela y Trinidad y Tobago.

La Tabla 9 evalúa el nivel de predicción del modelo utilizado aplicando la ecuación sobre la misma información base. De acuerdo con las características de género, edad, educación, ingresos y empleo, considerando un umbral de 50% como límite de clasificación, se estimó que 9 162 personas harían uso de efectivo por no encontrarse bancarizadas, de las cuales se constató que 6 083 fueron clasificadas correctamente, es decir, el 66% del total. El error de predicción corresponde a 3 079 individuos (34%) cuya probabilidad de utilizar efectivo fue superior al 50%, cuando en la realidad pertenecen al otro grupo. Asimismo, el modelo estimó que 9 868 individuos tendrían acceso al sistema financiero y, por tanto, no utilizarían únicamente dinero físico, de los cuales 6 763 efectivamente respondieron en la encuesta que tienen una cuenta bancaria, por lo que se estaría clasificando adecuadamente al 69% de este grupo. En este caso, el error de predicción corresponde a 3 105 personas (31%) cuya probabilidad de utilizar efectivo fue inferior al 50%, pero realmente sí lo usan. Al contrastar las estimaciones efectuadas con los datos reales, el porcentaje de ganancia total en la predicción del modelo es de 32,5%.

Tabla 9. Nivel de predicción del modelo (umbral: 0,50)

	Ecuación estimada			Probabilidad constante		
	Dep=0	Dep=1	Total	Dep=0	Dep=1	Total
P(Dep=1)≤C	6 763	3 079	9 842	9 868	9 162	19 030
P(Dep=1)>C	3 105	6 083	9 188	0	0	0
Total	9 868	9 162	19 030	9 868	9 162	19 030
Correcto	6 763	6 083	12 846	9 868	0	9 868
% Correcto	68,53	66,39	67,50	100,00	0,00	51,85
% Incorrecto	31,47	33,61	32,50	0,00	100,00	48,15
Ganancia total*	-31,47	66,39	15,65			
Ganancia (%) **	NA	66,39	32,50			

	Ecuación estimada			Probabilidad constante		
	Dep=0	Dep=1	Total	Dep=0	Dep=1	Total
E(# of Dep=0)	5 953	3 920	9 874	5 117	4 751	9 868
E(# of Dep=1)	3 914	5 241	9 156	4 751	4 411	9 162
Total	9 868	9 162	19 030	9 868	9 162	19 030
Correcto	5 953	5 241	11 195	5 117	4 411	9 528
% Correcto	60,33	57,21	58,83	51,85	48,15	50,07
% Incorrecto	39,67	42,79	41,17	48,15	51,85	49,93
Ganancia total*	8,48	9,06	8,76			
Ganancia (%) **	17,60	17,48	17,54			

*Cambio en "% Correcto" desde la especificación por default (probabilidad constante)

**Porcentaje de predicción para incorrecto (default) corregido por la ecuación
Fuente: Autores

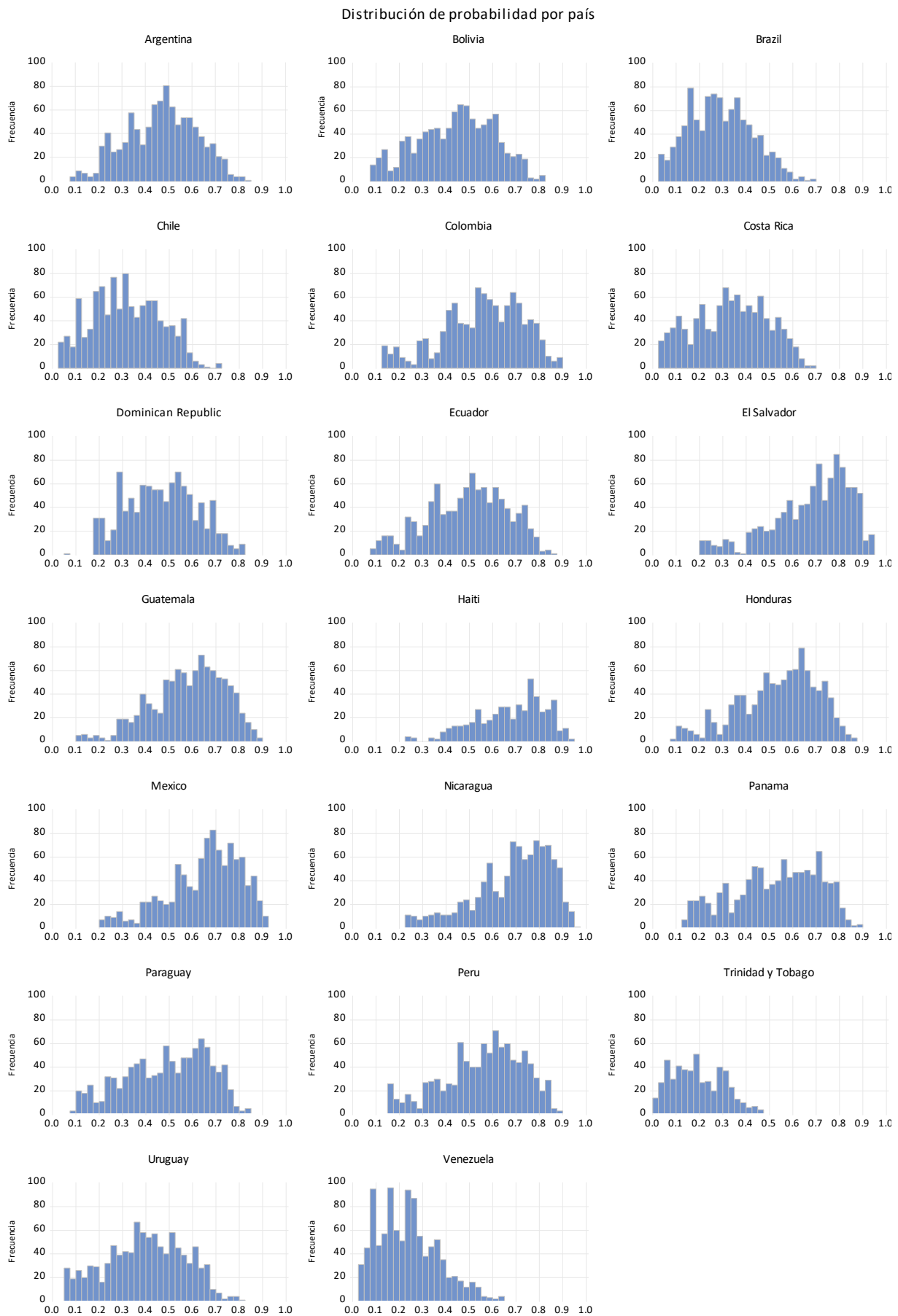


Figura 2. Distribución de frecuencias de la probabilidad estimada, segmentada por país

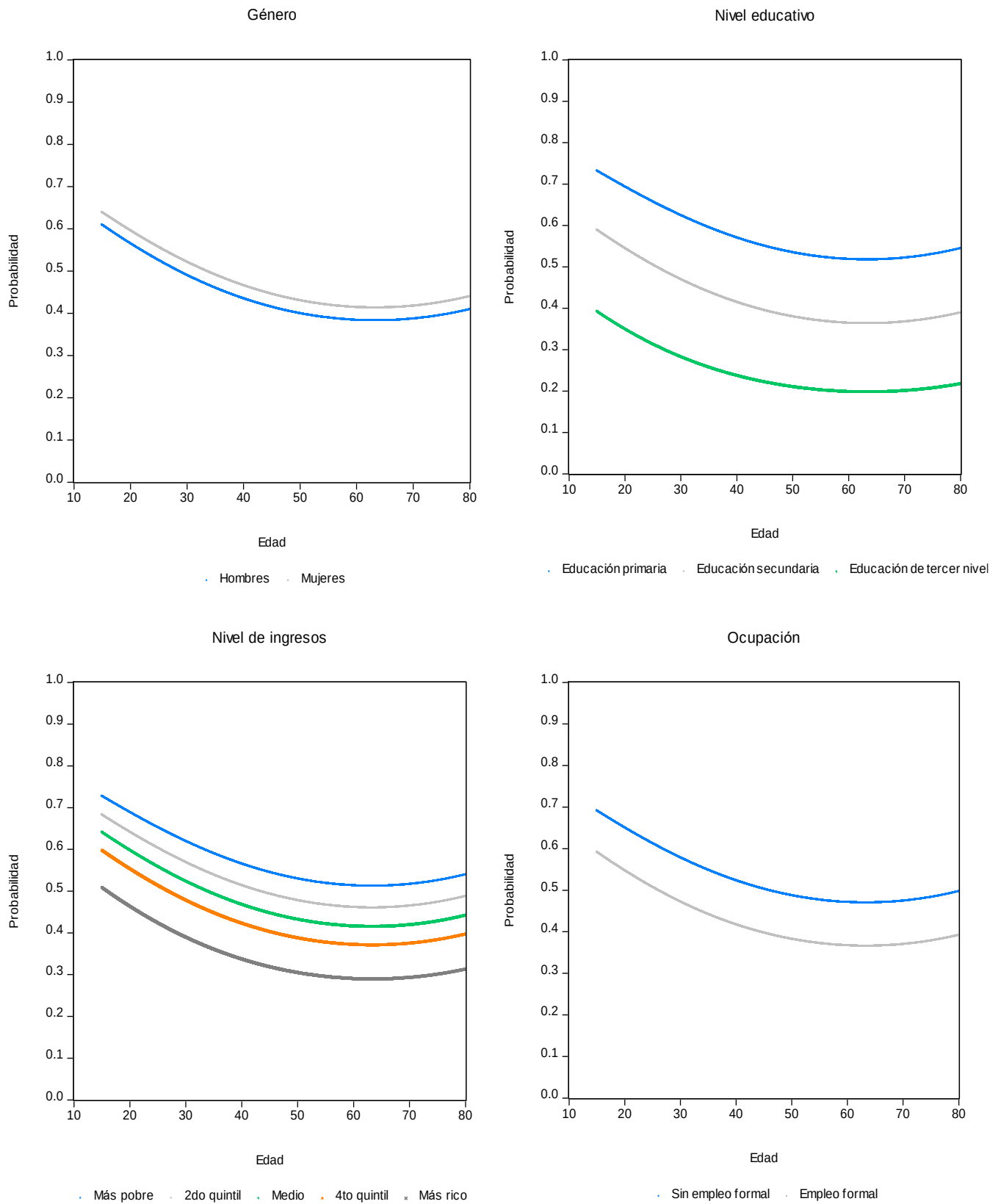


Figura 3. Simulación de escenarios de probabilidad, por variable categórica

5.2. Análisis de escenarios

La Figura 3 condensa la probabilidad de uso de efectivo en función de la edad simulada para cada una de las variables explicativas por sus categorías. Todos los modelos se mueven de forma paralela y la probabilidad de éxito tiende a disminuir conforme crece la edad hasta la época de retiro o jubilación, 65 años aproximadamente, a partir de la cual el uso de efectivo tiende a incrementarse con la edad.

El análisis de los distintos escenarios se presenta a continuación.

- a) En un primer escenario, por género, se detecta que las mujeres tenderían a utilizar más efectivo que los hombres en distintas edades, con una diferencia de hasta 3 puntos porcentuales, considerando el promedio de las otras variables explicativas.
- b) En un segundo escenario, se identifican diferencias más pronunciadas en la probabilidad de uso de dinero físico entre los individuos desempleados y aquellos que tienen un empleo formal. En la simulación efectuada, el desempleo aumenta hasta en 11 puntos porcentuales la probabilidad de uso de efectivo, dejando los demás regresores en sus niveles promedio.
- c) Un tercer escenario muestra que mejores niveles educativos tienden a disminuir el uso de efectivo frente a distintas edades. La educación secundaria reduce hasta en 16 puntos porcentuales la probabilidad de manejo de dinero físico con respecto a la educación primaria, mientras que los estudios universitarios disminuyen 17 puntos porcentuales adicionales esta probabilidad.
- d) Por último, el cuarto escenario identifica al quintil más pobre con la probabilidad más alta de utilizar efectivo en sus transacciones cotidianas según varía la edad, considerando que las demás variables explicativas toman el valor medio. El pertenecer al segundo quintil de la población en función de la renta percibida haría que la probabilidad disminuya en 5 puntos porcentuales con respecto al grupo más pobre. Una reducción similar en el uso de efectivo sucedería al subir una escala en el nivel de ingresos, en 4 puntos porcentuales en el caso del tercer quintil y 5 puntos porcentuales para el cuarto quintil. La brecha se acentúa al saltar al grupo de mayores ingresos, puesto que la probabilidad de uso de efectivo sería 8 puntos porcentuales menor al del quintil precedente.

6. CONCLUSIONES

En América Latina, el efectivo continúa siendo ampliamente utilizado, comparado con el resto del mundo, tanto por la población que no tiene acceso a servicios financieros como por aquellos consumidores bancarizados. Un elevado uso de dinero físico genera ineficiencias, facilita la evasión tributaria y podría estar asociado al lavado de activos, por lo que es de interés conocer los factores que determinan su preferencia. Los hallazgos se resumen a continuación.

Primero, encontramos que la población femenina latinoamericana, con educación básica, en condiciones de pobreza y que está desempleada, es más propensa a utilizar efectivo en sus transacciones.

Segundo, notamos que la edad se asocia de forma no lineal con el uso de dinero físico, siendo los jóvenes y los ancianos los que tienden a utilizarlo en mayor medida.

Tercero, de los factores analizados, el grado educativo, el nivel de ingresos y el empleo formal tienen una mayor influencia en la elección de dinero como medio de pago.

Cuarto, si bien la educación y el ingreso guardan una relación directa con el uso de dinero físico, al considerar los distintos grados académicos y la renta percibida agrupada por quintiles, estos factores se mueven en dirección opuesta.

Estos hallazgos coinciden con la idea de promover la inclusión financiera en América Latina y dirigir la implementación de políticas públicas hacia mujeres de escasos recursos y que carezcan de un empleo formal, así como a niños y jóvenes, fomentando la bancarización y el incentivo del uso de medios de pago alternos. Complementariamente, el diseño de políticas que prioricen la educación de la ciudadanía, fortalezcan el empleo y tiendan a mejorar el nivel de vida de los trabajadores, desincentivarían, per se, el uso de efectivo.

7. RECOMENDACIONES

Como recomendación sería deseable desarrollar investigaciones posteriores donde se analicen los efectos de la pandemia en el uso de alternativas de pago digitales, en respuesta a las políticas de aislamiento que se implementaron en todo el mundo.

Asimismo, sería interesante desarrollar una investigación sobre si la disminución del uso de dinero en efectivo incide en el ahorro y mayor desarrollo económico en la región.

Finalmente, creemos que sería interesante desarrollar una investigación de la evolución de las Fintech para el mercado de pagos, así como su marco regulatorio con el fin de entender cuáles son sus limitantes y sus oportunidades.

REFERENCIAS

- Alfonso V., Tombini A., & Zampolli F., (2020), *Retail payments in Latin America and the Caribbean: present and future*. https://www.bis.org/publ/qtrpdf/r_qt2012f.pdf
- Amromin, G., & Chakravorti, S. (marzo de 2007). *Debit card and cash usage: A cross-country analysis*. Federal Reserve Bank of Chicago. <https://www.chicagofed.org/-/media/publications/working-papers/2007/wp2007-04-pdf>
- Andrews, D. W. Chi-Square Diagnostic Test for Econometric Models: Theory. *Econometrica*, 56(6), 1419-1453. <https://www.jstor.org/stable/1913105>.

- Bech, M., Faruqui, U., Ougaard, F., & Picillo, C. (11 de marzo de 2018). Payments are a-changin' but cash still rules. *BIS Quarterly Review*, 67-80. https://www.bis.org/publ/qtrpdf/r_qt1803g.pdf
- Board of Governors of the Federal Reserve System. (Marzo de 2012). Consumers and mobile financial services. *Federal Reserve Report*. <https://www.federalreserve.gov/econresdata/mobile-device-report-201203.pdf>
- Board of Governors of the Federal Reserve System. (Septiembre de 2012). Use of financial services by the unbanked and underbanked and the potential for mobile financial services adoption. *Federal Reserve Bulletin*, 98(Sept). https://www.federalreserve.gov/pubs/bulletin/2012/pdf/mobile_financial_services_201209.pdf
- Briglevics, T., & Schuh, S. (Marzo de 2014). U.S. consumer demand for cash in the era of low interest rates and electronic payments. (E. C. Bank, Ed.) [Working Paper Series (1660)]. <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scpwps/ecbwp1660.pdf>
- Cabezas L., Jara A. (Diciembre de 2021). *Demanda de dinero en efectivo: hechos estilizados y sustitución por medios de pago electrónicos*. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/47708>
- Dabla-Norris, E., Deng, Y., Ivanova, A., Karpowicz, I., Unsal, F., VanLeemput, E., y Wong, J. (2015). *Inclusión financiera: un enfoque centrado en América Latina*. Boletín Octubre-Diciembre. CEMLA.
- Greene, W. H. (2003). *Bivariate and Multivariate Probit Models en Econometric Analysis* (Quinta ed., pp. 170 - 179). Prentice Hall.
- Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression* (Segunda ed.). John Wiley & Sons.
- Humphrey, David B., (2004), Replacement of cash by cards in US consumer payments. *Journal of Economics and Business*, 56(3), 211-225. <https://doi.org/10.1016/j.jeconbus.2003.09.001>.
- Keynes, J.M. (1970). *Teoría general de la ocupación el interés y el dinero*. Editorial Muñoz S.A.
- Kombe, C. A., Yabu, N., Mwita, D. L., & Mbiha, G. E. (2020) Mobile Phone Payments and Demand for Cash: The Case of Tanzania. *American Journal of Industrial and Business Management*, 10(8), 1505-1573. <https://doi.org/10.4236/ajibm.2020.108099>
- Mukhopadhyay, B. (2016). Understanding cashless payments in India. *Financial Innovation*, 2(27), 2-26. <https://doi.org/10.1186/s40854-016-0047-4>
- Tobin, J. (1956). The Interest Elasticity of Transaction Demand for Cash. *Review of Economics and Statistics*. 38(3), 241-247. https://is.muni.cz/el/1456/jaro2013/MPE_NKMA/um/39243250/TobinRES1956.pdf



investigador sobre mecanismos para la generación de alertas tempranas; la administración, el monitoreo y la evaluación de los riesgos financieros y sistémicos; y, la sostenibilidad financiera en el Ecuador y en Latinoamérica.

Olga Delgado, Ingeniero financiero por la Universidad Internacional SEK, Magíster en Riesgo Financiero (MSc) por la Escuela Politécnica Nacional y Master en Administración de Negocios en Finanzas (MBA) por KAIST. Experto de Riesgo Sistémico en el Banco Central del Ecuador, docente universitario, consultor independiente e



investigador sobre sistemas y medios de pago; la administración, el monitoreo y la evaluación de los riesgos financieros y sistémicos; y, la inclusión social y financiera en el Ecuador y en Latinoamérica.

Jorge Barrera, Analista de Sistemas e Informática por la Escuela Politécnica Nacional, Ingeniero en Sistemas por la Escuela Politécnica del Ejército, MBA en Negocios Internacionales por la Universidad Católica, Doctorando por la Universidad Complutense de Madrid. Coordinador de Riesgos de Operaciones en el Banco Central

BIOGRAFÍA

ANEXOS

Anexo 1 – Indicadores financieros
Mayores de 15 años
Valores en porcentaje del total de la población

País	Cuentas Bancarias	Propiedad de tarjetas de crédito	Propiedad de una tarjeta de débito	TD utilizada para realizar una compra	Depósitos	Cuenta en una institución financiera	Pagos digitales realizados	Realizaron o recibieron pagos digitales	Cuenta de dinero móvil	Ahorraron dinero	Ahorraron en una institución financiera	Utilizó TD o TC para realizar compra	Utilizó un telf. móvil o Internet para acceder a Cta de IFI	Utilizó Internet para comprar algo en línea
Argentina	0,49	0,24	0,41	0,22	0,67	0,48	0,32	0,40	0,02	0,30	0,07	0,32	0,10	0,14
Bolivia	0,54	0,07	0,28	0,07	0,64	0,51	0,33	0,40	0,07	0,55	0,16	0,10	0,06	0,05
Brasil	0,70	0,27	0,59	0,33	0,73	0,70	0,46	0,58	0,05	0,32	0,14	0,39	0,13	0,14
Chile	0,74	0,30	0,60	0,47	0,79	0,74	0,56	0,65	0,19	0,49	0,21	0,53	0,25	0,23
Colombia	0,46	0,14	0,26	0,12	0,69	0,45	0,29	0,37	0,05	0,39	0,09	0,18	0,07	0,08
Costa Rica	0,68	0,14	0,52	0,31	0,73	0,68	0,46	0,59		0,58	0,23	0,35	0,18	0,18
República Dominicana	0,56	0,16	0,32	0,16	0,72	0,55	0,33	0,44	0,04	0,52	0,19	0,23	0,07	0,07
Ecuador	0,51	0,09	0,28	0,10	0,64	0,51	0,22	0,32	0,03	0,34	0,12	0,14	0,05	0,06
Guatemala	0,44	0,07	0,16	0,08	0,67	0,44	0,27	0,33	0,02	0,42	0,12	0,10	0,03	0,05
Honduras	0,45	0,05	0,17	0,09	0,64	0,43	0,30	0,37	0,06	0,42	0,15	0,10	0,04	0,04
Haití	0,33	0,07	0,11	0,04	0,40	0,28	0,23	0,28	0,14	0,44	0,12	0,06	0,09	0,03
México	0,37	0,10	0,25	0,13	0,59	0,35	0,23	0,32	0,06	0,41	0,10	0,16	0,06	0,07
Nicaragua	0,31	0,05	0,16	0,06	0,52	0,28	0,18	0,25	0,04	0,45	0,08	0,09	0,02	0,03
Panamá	0,46	0,08	0,29	0,15	0,65	0,46	0,25	0,35	0,04	0,48	0,14	0,17	0,06	0,06
Perú	0,43	0,12	0,28	0,09	0,70	0,42	0,25	0,34	0,03	0,40	0,08	0,14	0,04	0,04
Paraguay	0,49	0,07	0,15	0,06	0,67	0,31	0,37	0,45	0,29	0,27	0,06	0,09	0,03	0,03
El Salvador	0,30	0,06	0,19	0,09	0,67	0,29	0,18	0,24	0,04	0,38	0,11	0,12	0,04	0,03
Venezuela, RB	0,73	0,29	0,66	0,61	0,87	0,73	0,65	0,69	0,11	0,41	0,19	0,61	0,29	0,13
Trinidad y Tobago	0,81	0,16	0,61	0,38	0,70	0,81	0,50	0,64		0,71	0,36	0,41	0,13	0,16
Uruguay	0,64	0,41	0,56	0,35	0,77	0,64	0,53	0,59		0,37	0,12	0,51	0,16	0,24

Fuente: Global Findex

Anexo 2 - Criterios de información estadística

Una vez que se han determinado los parámetros del modelo de regresión binaria, es preciso contar con los criterios de información estadística con el fin de evaluar la consistencia del modelo utilizado. Los estadísticos más sencillos corresponden a la media y la varianza de la variable dependiente estimada, el error estándar de la regresión y la suma de los residuos al cuadrado. Estas medidas se calculan de la forma tradicional utilizando los residuos ordinarios, donde $\hat{\beta}$ corresponde al coeficiente de la función restringida.

$$e_i = y_i - E[y_i|x_i] = y_i - (1 - \Phi(x_i'\hat{\beta})) \quad (11)$$

El coeficiente de determinación $R^2 = 1 - l(\hat{\beta})/l(\hat{\beta})$ es el índice de la razón de verosimilitud, análogo al estadístico reportado en los modelos de regresión lineal. Esta medida estadística sirve para valorar el ajuste del modelo en la predicción de los valores de la variable dependiente, con la propiedad de que está acotado entre 0 y 1.

Los criterios de información de Akaike, Schwarz y Hannan-Quinn también se utilizan en modelos de regresión binaria para medir la bondad de ajuste del modelo en la predicción de los valores de las variables endógenas.

Adicionalmente, se cuenta con estadísticos basados en la función de máxima verosimilitud como el valor maximizado de la función $\log l(\hat{\beta})$, el valor promedio de la función al dividirla para el número de observaciones, y el valor restringido de la función, cuando se calcula la probabilidad media no condicionada de éxito igualando a 0 todos los coeficientes.

Anexo 3 - Pruebas de bondad de ajuste

Para evaluar la significancia total del modelo se utiliza el estadístico $LR = -2(l(\hat{\beta})(x_i'\hat{\beta}))$, que prueba la hipótesis nula conjunta de que todos los coeficientes son cero, a excepción del término constante. Los grados de libertad son el número de coeficientes de la ecuación menos 1, que vendrían a ser el número de restricciones bajo prueba.

Sobre la base del estadístico LR , podemos calcular la probabilidad de la prueba, más conocido como el valor crítico o valor p . Bajo la hipótesis nula, el estadístico LR es asintóticamente distribuido como una variable χ^2 con grados de libertad iguales al número de restricciones bajo prueba.

Para la prueba Hosmer-Lemeshow, los datos se reúnen en $j = 1, 2, \dots, J$ grupos, con n_j observaciones dentro de cada grupo j . Se define el número de $y_i = 1$ observaciones como $y(j) = \sum_{i \in j} y_i$ y el promedio de los valores proyectados en el grupo j como:

$$\bar{p}(j) = \sum_{i \in j} \hat{p}_i / n_j = \sum_{i \in j} (1 - F(x_i'\hat{\beta})) / n_j \quad (12)$$

Entonces, el estadístico Hosmer-Lemeshow (H-L) se calcula:

$$HL = \sum_{j=1}^J \frac{(y(j) - n_j \bar{p}(j))^2}{n_j \bar{p}(j)(1 - \bar{p}(j))} \quad (13)$$

La distribución del estadístico HL no es conocida, sin embargo, Hosmer y Lemeshow (2000), tras efectuar una extensa simulación, reportaron evidencia de que cuando J se acerca a n y el modelo es correctamente especificado, la distribución del estadístico se aproxima a una χ^2 con $J - 2$ grados de libertad.

Asimismo, la prueba de Andrews verifica la significancia del modelo. Los datos se congregan en $j = 1, 2, \dots, J$ grupos. Dado que y es una variable binaria, hay $2J$ posibilidades en las que cualquier observación puede recaer. Andrews (1988) comparó el vector $2J$ del número de observaciones reales en cada celda con las estimadas por el modelo, construyó una forma cuadrática y mostró que esta forma cuadrática tiene una distribución χ^2 asintótica si el modelo fue especificado correctamente. Se utilizó la prueba sugerida por el autor mediante el cálculo de una regresión auxiliar.

Sea $\bar{A}$ la matriz $n \times J$ con el elemento $\bar{a}_{ij} = 1(i \in j) - \hat{p}_i$ donde el indicador $1(i \in j)$ de la función toma el valor de 1 si la observación i pertenece al grupo j con $y_i = 1$; y, 0, en el caso contrario. La prueba excluye las observaciones de los grupos con $y_i = 0$ para evitar una matriz singular.

Sea B la matriz $n \times K$ de contribuciones del puntaje $\frac{\delta l(\beta)}{\delta \beta}$. El estadístico de la prueba de Andrews es n veces el coeficiente de determinación R^2 al regresar la constante (1) en cada columna de las matrices $\bar{A}$ y B . Bajo la hipótesis nula de que el modelo está adecuadamente especificado, nR^2 se distribuye asintóticamente como una variable χ^2 con J grados de libertad.

Estudio del Reforzamiento de Mampostería de Bloque de Hormigón mediante Ensayos Destructivos Aplicados a Pórticos de Acero con Juntas Apernadas

Játiva, Jefferson¹ ; Torres, Ivett² ; Hernández, Luis³ ; Arévalo, Diego⁴ 

^{1,2}Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

^{3,4}Escuela Politécnica Nacional, Centro de Investigación de la Vivienda, Quito, Ecuador

Resumen: Este estudio parte de observar que la literatura es escasa, con respecto a la intervención en estructuras con pórticos de acero donde se trate de otorgar a sus rellenos de mampostería una función estructural desde un enfoque sismo-resistente. Sin embargo, es prioritaria una estrategia de intervención de estructuras de mampostería, de tal forma que se pueda prevenir y mitigar el riesgo sísmico y se reduzcan las pérdidas humanas. Por esta razón, se presenta un sistema de intervención estructural que se ha denominado *enchape*. Este sistema fue aplicado en dos prototipos de pórticos de acero que se diseñaron y construyeron con una conexión viga-columna precalificada con placa apernada al ala (BFP) y mampostería de relleno para ensayarlos en tres escenarios de estudio mediante la aplicación de carga lateral cíclica en el laboratorio y aplicando el protocolo tipo 1 establecido en el FEMA 461. Para ello, se procedió seleccionando materiales y geometrías que se utilizan en la construcción y que permitan desarrollar una metodología tanto de construcción como de ensayo en condiciones de laboratorio. Mediante este trabajo, se conoce el comportamiento de dichos prototipos al ser sometidos a una carga lateral cíclica, y de esta forma se propone una metodología de reforzamiento aplicable para estructuras de acero con rellenos de mampostería sin afectaciones sísmicas, y de rehabilitación para aquellas que han sufrido algún daño en su mampostería post sismo.

Palabras clave: reforzamiento, pórtico de acero, panel de relleno, ensayos destructivos, carga lateral cíclica

Study of the Reinforcement of Concrete Block Masonry through Destructive Tests Applied to Steel Frames with Bolted Joints

Abstract: This study is based on the fact that there is little literature on the intervention of steel frame structures in which masonry infills are given a structural function from a seismic-resistant approach. However, an intervention strategy for masonry structures is a priority to prevent and mitigate seismic risk and reduce human losses. For this reason, a structural intervention system called *enchape* is presented. This system was applied in two prototypes of steel frames designed and built with a prequalified beam-column connection Bolted Flange Plate (BFP) and infill masonry to test them in three study scenarios through the application of cyclic lateral load in the laboratory and applying the type 1 protocol established in FEMA 461. For this purpose, materials and geometries used in construction were selected to develop a methodology for both construction and testing under laboratory conditions. By means of this work, the behavior of these prototypes when subjected to a cyclic lateral load is known, in this way a reinforcement methodology applicable to steel structures with masonry infills without seismic affectations and rehabilitation for those that have suffered some damage in their post-earthquake masonry is proposed.

Keywords: reinforcement, steel frame, infill panel, destructive tests, cyclical lateral loading

1. INTRODUCCIÓN

En muchos países latinoamericanos, las técnicas de construcción para edificaciones se basan principalmente en el uso del hormigón como principal material estructural y mamposterías de relleno. Recientemente y con el advenimiento de la perfilería acero, se está optando por

cambiar esta tendencia en el Ecuador. Cada día son más las estructuras que se construyen tratando de armonizar el uso de estos dos materiales (hormigón - perfilería de acero), pero sin cambiar la utilización de mampuestos tipo bloque o ladrillo (Mosquera & Rosero, 2022).

*luis.hernandezr@epn.edu.ec

Recibido: 25/04/2022

Aceptado: 28/02/2023

Publicado en línea: 01/05/2022

10.33333/rp.vol51n2.08

CC 4.0

Los eventos sísmicos son capaces de afectar tanto a estructuras de hormigón armado como a las de acero estructural, por lo cual es conveniente buscar alternativas que permitan rehabilitar las estructuras afectadas y que brinden seguridad a aquellas que aún no han sufrido daños considerables en su mampostería. Lamentablemente, el riesgo sísmico es inminente, atentando contra todo tipo de estructuras, pero con mayor grado de afectación en aquellas que ya han tenido daños previos o que fueron construidas de manera informal.

Las alternativas de intervención para reforzamiento y rehabilitación constituyen un sistema de prevención y mitigación de los efectos telúricos. La intervención parte de un diagnóstico que establece las deficiencias estructurales sobre las cuales se debe trabajar y mejorar. La intervención se divide en dos fases: 1) Reparación y reforzamiento de edificios dañados por un sismo y 2) Reparación y reforzamiento de edificios con vulnerabilidad sísmica que aún no han experimentado sismos severos (Borja & Torres, 2015). La intervención permite: aumentar la rigidez, aumentar la resistencia o capacidad, proporcionar ductilidad y amortiguamiento.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Los marcos estructurales con rellenos de mampostería son usados con frecuencia en zonas de alta sismicidad y especialmente donde la mampostería continúa siendo una alternativa de construcción económica (Crisafulli, 1997). Estos muros de mampostería son utilizados para rellenar pórticos de concreto y de acero, ya sea para distribuir el espacio interior o para separar el espacio interior del exterior del edificio (Kahrizi & TahamouliRoudsari, 2020).

Cuando la estructura está sometida a una fuerza lateral, el muro de relleno tiende a conectarse con el pórtico que lo rodea, lo que puede dar lugar a diferentes formas de fallo dentro y fuera del plano del pórtico e inclusive se puede observar un aumento en la rigidez lateral de la estructura que puede provocar un cambio significativo en su respuesta sísmica (Kahrizi & TahamouliRoudsari, 2020). Por lo tanto, la mampostería no debe ser ignorada en el análisis y diseño de estructuras sometidas a cargas laterales (Moghadam et al., 2006).

2.1. Mampostería de relleno

Gran parte de las estructuras latinoamericanas se constituyen de mampostería, debido a su bajo costo y al fácil proceso constructivo que no requiere de mano de obra calificada para su ejecución. Además, se puede hacer uso de materiales convencionales como bloques huecos de hormigón, ladrillos, adobe, etc. Sin embargo, todos los aspectos mencionados con anterioridad la convierten en una estructura muy frágil (Ghobadi et al., 2019). A pesar de que existen factores inherentes a este sistema estructural, como la mano de obra, calidad de los materiales y la configuración arquitectónica, existen otros factores que intervienen en el comportamiento de los marcos con rellenos de mampostería. Los más importantes son:

- **Presencia de aberturas:** debido a la presencia de ventanas y puertas, se presentan concentraciones de esfuerzos y reducción de resistencia, de igual forma no contar con la sección completa reduce la rigidez del panel. Dawe & Seah (1989) se basaron en 28 pruebas a gran escala de marcos de acero rellenos de bloques de hormigón, observaron que las aberturas en un panel (17,5% del área del panel) reducían la carga inicial de la grieta principal, pero no tenían un efecto significativo en la carga final. Liu & Manesh (2013) ensayaron 10 pórticos de acero con rellenos de bloque de hormigón y observaron que el modo de fallo predominante fue el aplastamiento de las esquinas cuando el relleno no tiene aberturas, mientras que los especímenes con aberturas mostraron el agrietamiento diagonal como el modo de falla predominante.
- **Conectores de corte:** La evaluación experimental del comportamiento de marcos de acero con rellenos de mampostería, haciendo énfasis en diferentes conexiones entre marco y mampostería, determinó que la forma en que estos se conectan no sólo puede afectar significativamente al patrón de formación de grietas y a los modos de fallo del muro de relleno, sino que también altera la rigidez, resistencia, ductilidad, deformación fuera del plano y cantidad de disipación de energía del marco (Kahrizi & TahamouliRoudsari, 2020).
- **Presencia de carga vertical:** la mayoría de las investigaciones han obviado la presencia de carga vertical considerando que el enfoque es conservador. Sin embargo, Liu & Manesh en su estudio analizan pórticos de acero con rellenos de mampostería de bloque sometidos a carga lateral y vertical, concluyendo que la presencia de esta última aumenta la resistencia lateral y cuando mayor sea mayor es el aumento (Liu & Manesh, 2013).
- **Inestabilidad fuera del plano:** la falla fuera del plano en los rellenos de mampostería se asocia a las condiciones de borde, la relación de aspecto o esbeltez del panel, presencia de aberturas y a la combinación de las solicitaciones en ambos sentidos. La inestabilidad en los rellenos genera colapso ya que fuera del plano son muy esbeltos y sumamente deformables.
- **Historial de carga:** El historial de carga en la estructura es un factor importante, inicialmente funciona al cien por ciento de su capacidad, pero para futuros eventos adversos, esta responderá con una rigidez, resistencia y capacidad de disipación degradada.

2.2. Mecanismos de falla en mamposterías de relleno

Según El-Dakhkhni et al. (2003), en base a estudios analíticos y experimentales, engloba 5 modos de falla, los que se representan en la Figura 1.

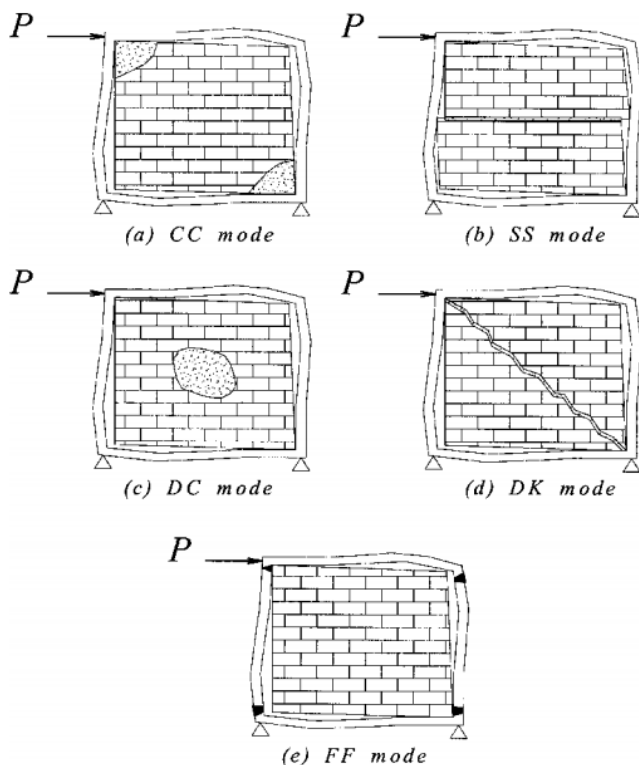


Figura 1: Modos de falla en mamposterías de relleno

- **Aplastamiento en esquinas (CC-Corner Crushing):** debido a la concentración de esfuerzos en la diagonal de compresión y se asocia a rellenos con mampuestos débiles rodeados por un marco con conexiones débiles y estructura fuerte (El-Dakhkhni et al., 2003).
- **Corte por deslizamiento (SS-Sliding Shear):** está controlada por la adhesión y fricción de las juntas y la relación entre la carga de compresión y el corte actuante en el panel (Pachano, 2018). Este comportamiento está asociado a un relleno con juntas de mortero débiles y un marco circundante fuerte (El-Dakhkhni et al., 2003).
- **Compresión diagonal (DC-Diagonal Compression):** se produce el aplastamiento del relleno en su región central, y se asocia a rellenos relativamente delgados en donde la falla resulta de la inestabilidad fuera del plano.
- **Agrietamiento Diagonal (DC-Diagonal Cracking):** se origina cuando los esfuerzos de tensión generados por la aplicación de la carga sobrepasan la resistencia a tensión de los mampuestos. Este comportamiento se asocia a un marco débil o un marco con conexiones débiles y miembros fuertes rellenos con mampostería fuerte (El-Dakhkhni et al., 2003).
- **Falla en el Marco (FF-Frame Frailure):** se generan rótulas plásticas en columnas o en las conexiones viga-columna, esta falla se asocia a un marco circundante débil con conexiones débiles en comparación al panel de relleno. Generalmente, en los marcos de acero con mampostería de relleno se presentan

algunas formas de daño: la fluencia por flexión ante cargas laterales en la base de las columnas, la fluencia por corte producido en secciones no compactas sin embargo los daños no son graves, la falla en la conexión producida por la gran fuerza del puntal diagonal que provoca una tensión axial considerable.

2.3. Intervención estructural mediante enchape

El enchape es un proceso de intervención, que consiste en dar un papel estructural a la mampostería, confinando la mampostería con malla electrosoldada, elementos de sujeción y finalmente un enlucido con mortero de baja resistencia. La finalidad es brindar a las estructuras mayor rigidez y permitir que las paredes inicialmente de relleno se comporten como un muro estructural resistente a cargas laterales (Borja & Torres, 2015).

Angulo & López (2008) estudiaron sobre mampostería de ladrillo artesanal, observando que el enchape de refuerzo empezó a trabajar una vez alcanzada la resistencia del ladrillo. Se evidenció una recuperación de un 90% de la rigidez con un aumento de la resistencia a carga lateral del 157% inicial luego de la rehabilitación a través del enchapado.

Abdel-Hafez et al. (2014) realizaron ensayos experimentales para determinar el comportamiento de diferentes pórticos de hormigón armado de un solo piso rellenos de mampostería de bloque bajo la influencia de cargas laterales en el plano. Analizaron el comportamiento de pórticos rellenos luego de reforzar la mampostería con un sistema de enlucido y mallas de ferrocemento. Este método de refuerzo fue recomendado para mejorar la ductilidad y la resistencia evidenciándose que el comportamiento del pórtico reforzado de esta manera, en comparación de otros realizados en ese mismo estudio, era el mejor. La ductilidad aumentó un 30% en comparación de un marco sin relleno y las cargas laterales a la cual se producían las grietas y rotura aumentaron de igual manera.

Alcocer et al. (1996), construyeron prototipos de pórticos de hormigón armado con mampostería de relleno a escala real, los cuales fueron reforzados con malla electrosoldada y mortero para ensayarse ante cargas laterales cíclicas en dos fases. La primera consistió en dos ensayos en un mismo prototipo tridimensional de dos niveles, antes y después de rehabilitarlo. La segunda consideró cuatro prototipos que se reforzaron sin daño inicial y se ensayaron. Se comparó los patrones de agrietamiento, curvas de histéresis, rigidez, resistencia al corte y capacidad de deformación. En todos los casos, el agrietamiento fue gobernado por deformaciones por corte, los prototipos reforzados presentaron una distribución uniforme de grietas, la rigidez de los especímenes reforzados alcanzó valores cercanos a los iniciales y en cuanto a resistencia se observó que la contribución de la malla electrosoldada dependía de algunos aspectos inmersos en la metodología de construcción adoptada.

En la bibliografía revisada, el único estudio de reforzamiento con un método similar a esta investigación fue el realizado por Ghobadi et al. (2019). El método de reparación propuesto consistió en parchar las grietas generadas en los rellenos con

mallas metálicas engarzadas en forma de tiritas y posteriormente estas se cubrían con yeso cementoso.

3. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

3.1. Alcance

Se construyeron dos prototipos de acero con conexión con placa apernada al ala (BFP), se analizaron tres escenarios (pórtico reforzado, pórtico con relleno y pórtico rehabilitado), se ensayó a carga lateral cíclica. Así se conoce el comportamiento del sistema estructural, progreso de daños, y las propiedades mecánicas: resistencia o capacidad, rigidez, ductilidad, energía disipada. Para ello se requirió aplicar patrones de cargas reversibles que superen el rango elástico del pórtico de acero causando deformaciones permanentes por daño en los componentes.

Con el objetivo de simular una carga vertical que comúnmente existen en las edificaciones debido a la carga muerta y viva, a ambos prototipos se les colocó una losa de hormigón a lo largo de toda la viga y sobre una lámina deck que sirvió de encofrado permanente. El ancho de la losa fue 500 mm y la altura total de 200 mm y 150 mm sobre la cresta de la lámina.

3.2. Geometría y materiales

El **pórtico circundante** y conexión mostrado en Figura 2a está conformado por acero estructural laminado en caliente ASTM A36. La geometría de las secciones es consistente con las limitaciones del laboratorio y acorde con ANSI/AISC 341-16, (2016). La configuración adoptada del prototipo satisface todos los requerimientos de un sistema de Pórticos Especiales a Momento (*SMF*).

La conexión de los pórticos de acero mostrada en Figura 2b fue *BFP* (AISC 358-16, 2016), se trata de una conexión a momento. Los pernos utilizados son de alta resistencia (ASTM F3125/F3125M-19, 2019). Con esta conexión se espera la formación de rótulas plásticas o fluencia del acero en la viga en regiones aledañas a la placa conectada a las alas de vigas.

La **mampostería de relleno** se constituye por bloques huecos de hormigón 400x200x100 mm y por mortero de baja resistencia para las juntas, con una relación cemento:arena 1:4 alcanzando una resistencia a la compresión estándar 4,63 MPa. También se realizaron ensayos a compresión de prismas formados por 2 bloques dando una resistencia promedio de 3,78 MPa y muretes de 3 hiladas con dimensiones 630x630x100 mm con una resistencia promedio de 3,50 MPa

El **mortero de enchape** usado fue diseñado en laboratorio, cuya dosificación tiene una relación cemento:arena 1:3 alcanzando una resistencia a la compresión estándar de 10,59 MPa.

El **acero de refuerzo** utilizado en los elementos de conexión del pórtico circundante con el sistema de enchape empleado en la intervención estructural. Este acero corresponde a varillas micro aleadas soldables con resistencia a la fluencia de 420

MPa y a mallas electrosoldadas (M.E.S) $\phi 5$ mm @150 mm con resistencia a la fluencia mayor a los 500 MPa.

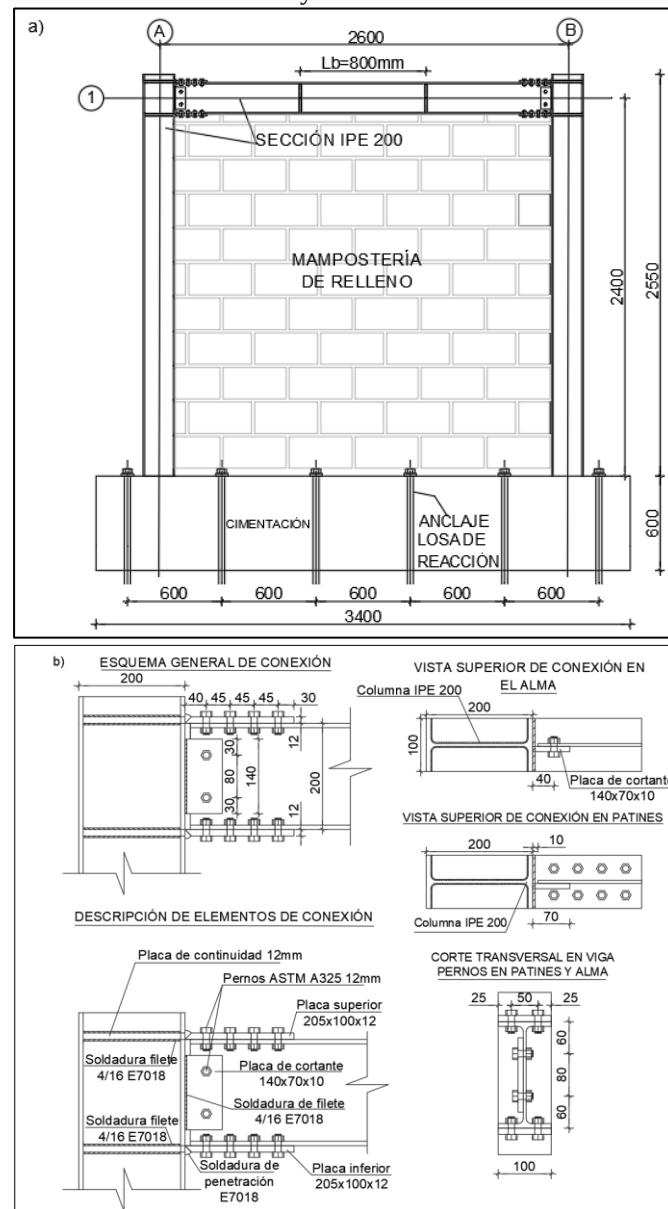


Figura 2. a) Marco de acero circundante, b) Conexión viga-columna. Dimensiones en mm

3.3. Definición de prototipos

El **prototipo 1**, consistió en la colocación del relleno de mampostería y seguidamente la colocación del enchape. Todo este procedimiento es realizado sin un daño previo en la mampostería, y hasta alcanzar un nivel de daño extenso del sistema marco de acero, mampostería y enchape. De esta forma, se conoce la efectividad del enchape, y es posible determinar las propiedades estructurales.

En el **prototipo 2** se estudió el pórtico con relleno de mampostería y luego rehabilitado. Consiste en la colocación del relleno de mampostería y someterlo a un ensayo cíclico hasta que en la mampostería se produzca un daño moderado limitando las derivas hasta 0,50%. Una vez obtenido el daño moderado en la mampostería, se procedió a estudiar el pórtico rehabilitado, rehabilitando el relleno de mampostería mediante

el enchape, y ensayarlo hasta producir el colapso total del sistema.

3.4. Condiciones del laboratorio

Se tiene una losa y muro de reacción sobre los cuales se apoyó los prototipos de estudio para la aplicación de carga lateral (ver Figura 3). El equipo de transmisión de carga consta de un cilindro hidráulico y una celda de carga, con capacidad de 1000 kN de avance y aproximadamente - 400 kN de reversa.

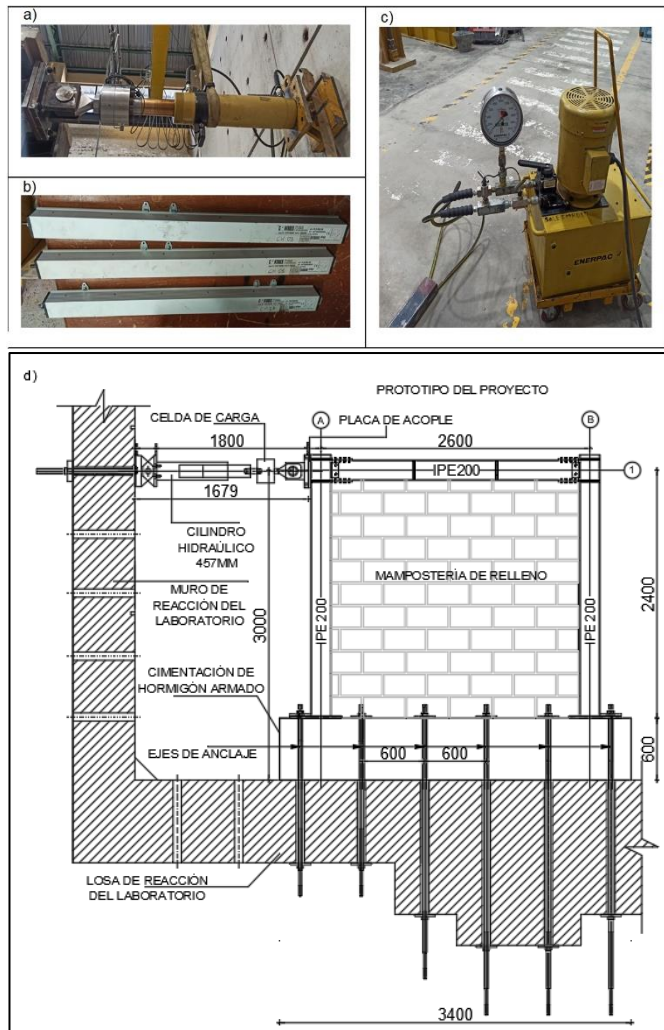


Figura 3. Equipos de laboratorio: a) Cilindro hidráulico y celda, b) LVDT para medición de desplazamientos, c) Bomba y mangueras para aplicación de carga, d) Disposición de los prototipos sobre losa y muro de reacción. Dimensiones en mm

La carga lateral se aplicó siguiendo las recomendaciones del FEMA 461, (2007) en el capítulo 2, que consisten en la aplicación cíclica lenta de carga o deformación con un patrón predeterminado, ver Figura 4.

4. PROPUESTA DE REFORZAMIENTO Y DETALLES CONSTRUCTIVOS

Para cumplir el objetivo del enchape es importante la ejecución de un buen anclaje entre la malla electrosoldada (M.E.S.) utilizada para el enchape y la estructura existente que conforma el panel de relleno.

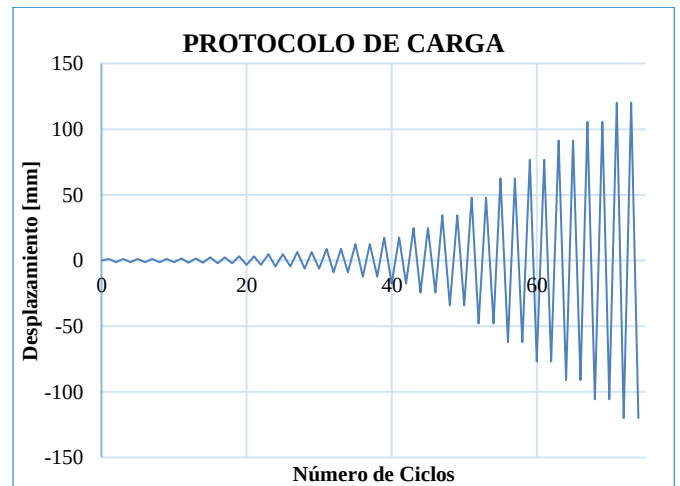


Figura 4. Protocolo de carga para ensayo.

4.1. Anclaje de M.E.S. a columnas

El anclaje del enchape con las columnas se realizó mediante el amarre de la M.E.S. confinante, con varillas de 8 mm de diámetro distribuidos cada 300 mm en toda la altura de la columna y una longitud de desarrollo de 500 mm en la mampostería, y se soldó a los perfiles de acero con una longitud de 40 mm mediante el proceso Gas Metal Arc Welding (GMAW) y con gas protector activo (CO₂) con la finalidad de transmitir los esfuerzos entre los perfiles y la M.E.S. Finalmente, se conectan con la M.E.S., mediante alambre de acero trefilado de bajo contenido de carbono.

4.2. Anclaje de M.E.S. a losa de entrepiso

Este anclaje, mostrado en Figura 5a, tiene como fin absorber las fuerzas cortantes generadas entre la mampostería y el conjunto viga-losa, para ello se introducen varillas verticales de 8 mm de diámetro y 500 mm de traslape que se extiende sobre la mampostería, y se ancla mediante una resina epóxica en el hormigón existente.

4.3. Anclaje de M.E.S. a cimentación

En el anclaje de la M.E.S. a la cimentación al igual que en la losa se debe garantizar la absorción del cortante generado en la base debido a la carga lateral. Las varillas son similares a las usadas para unir con la losa de entrepiso. En la Figura 5b, se observa un esquema de la conexión.

4.4. Anclaje de M.E.S. con mampostería

El anclaje de la M.E.S. a la mampostería se realizó mediante ganchos, estos corresponden a segmentos de barras corrugadas de acero de 4 mm de diámetro separados 300 mm entre sí en el sentido horizontal y vertical del panel. La longitud es 300 mm, permitiendo realizar dobleces de 70 mm a ambas caras del relleno. Finalmente, se amarra a la M.E.S. mediante alambre trefilado procurando situarla en el centro del enlucido de mortero; de esta forma se garantiza una zona confinada y otra de recubrimiento, ver Figura 5c.

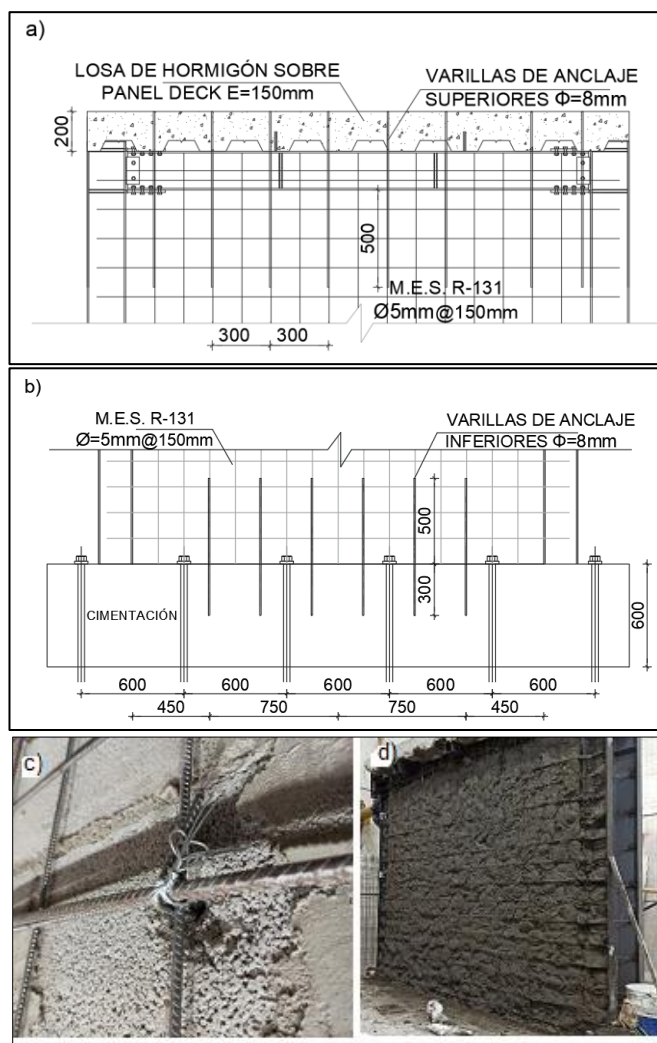


Figura 5. Esquemas de anclaje, a) Anclaje con losa de entrepiso, b) Anclaje de losa de cimentación, c) Anclaje de M.E.S. con mampostería, d) Enlucido con mortero. Dimensiones en mm

4.5. Enlucido con mortero de baja resistencia

Finalmente, se procede a colocar el enlucido con mortero de 40 mm de espesor a cada lado. Es importante garantizar una buena adherencia entre el mortero de enchape, el acero del reforzamiento (M.E.S, varillas y ganchos) y el pórtico de acero, ver Figura 5d.

4.6. Capacidad a corte

La capacidad a corte de los prototipos se obtiene como si se tratase de un muro estructural. Según ACI 318S-19 en la sección 11.5.4.3. establece que la resistencia a cortante del muro ϕV_n es la suma de las aportaciones del hormigón y del acero de refuerzo (ACI 318S-19, 2019). Para un muro de 80 mm de espesor, con el mortero de enlucido y la M.E.S definidos, se tiene una resistencia a corte cercana a las 510 kN.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Observaciones

En el **pórtico reforzado**: No se alcanzó el nivel de daño extenso y de colapso debido a la falla temprana del pórtico.

Los miembros (viga y columnas) se desplazaron fuera del plano debido a torsión en planta, provocando un rápido decaimiento de la resistencia, lo cual imposibilita la obtención de la carga última real.

En el **pórtico con panel de relleno**: Se ensayó hasta un nivel de daño moderado. El agrietamiento, en su mayoría, se desarrolló a lo largo de las juntas de mortero y el aplastamiento de algunos bloques situados en la zona central y en regiones cercanas a la columna donde se aplicó la carga.

En el **pórtico rehabilitado**: Se logró llevar el ensayo hasta el agotamiento completo, sin embargo, fue necesario establecer un punto límite de comportamiento, donde se evidencie el aporte de todo el sistema pórtico-panel. Se toma como punto límite el vigésimo cuarto ciclo del ensayo, punto donde se evidenció un desprendimiento de la mampostería con el pórtico de acero.

La metodología empleada para establecer los niveles de daño es la descrita en el FEMA 306, (1998), específicamente en la sección 8.4 presenta una guía para clasificar los daños de los componentes de marcos rellenos de mampostería, incluyendo pórticos de acero y de hormigón armado.

5.2. Descripción del comportamiento

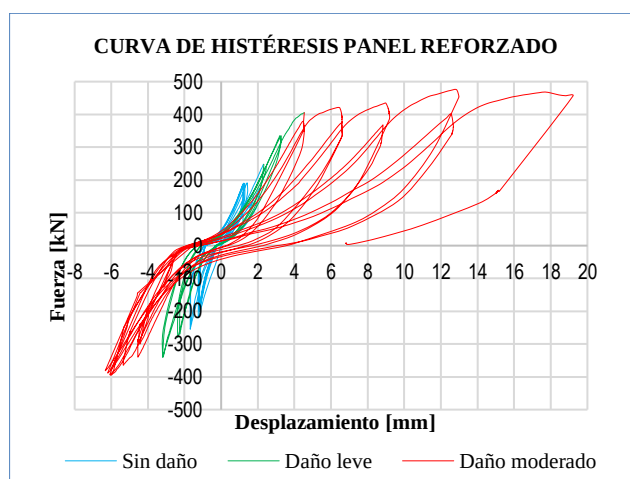


Figura 6. Curva de histéresis y niveles de daño (leve y moderado) del pórtico reforzado

La Figura 6 muestra la curva de histéresis del **pórtico reforzado**, en esta se han marcado tres etapas de daño:

1. Primeras fisuras muy poco notorias, no hay daños.
2. Hasta un nivel de daño leve, sin degradación significativa de rigidez y resistencia, con poca

disipación de energía, es decir, el prototipo presentó una respuesta muy rígida.

3. Hasta alcanzar un nivel de daño moderado, existe degradación de rigidez y mayor disipación de energía.

El daño leve se presentó como pequeñas fisuras en las diagonales principales de ambas caras del prototipo. Después se produjo el daño moderado, aquí se formaron grietas de mayor grosor sobre la mayor parte de la superficie del enlucido y existió desprendimiento de fragmentos en zonas cercanas a la viga.

La Figura 7 muestra la curva de histéresis del **pórtico con panel de relleno**, en esta se han marcado tres etapas:

1. Empiezan a notarse las primeras fisuras en las unidades de mampuesto y juntas, sin daños.
2. Hasta un nivel de daño leve, existe degradación significativa de rigidez y con poca disipación de energía.
3. Hasta un nivel de daño moderado, comportamiento con degradación de rigidez y mayor disipación de energía.

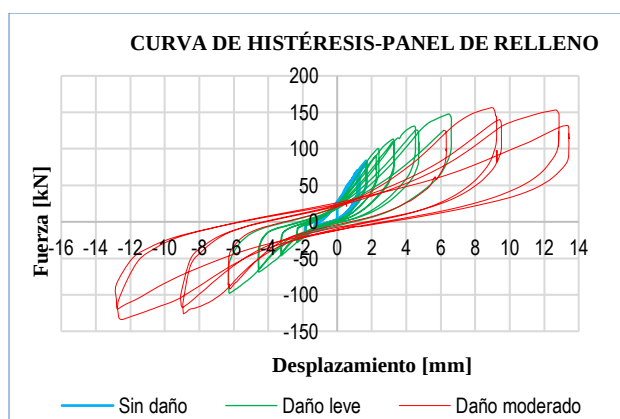


Figura 7. Curva de histéresis y niveles de daño para el pórtico con panel de relleno

El nivel de daño leve se alcanzó con fisuras en puntos específicos concentrados de ambas caras del prototipo. En el daño moderado se formaron grietas de mayor grosor en las unidades de mampuesto a lo largo de las diagonales y en las juntas de mortero. Además, se presentaron daños por desprendimiento de fragmentos en mampuestos y aplastamiento en el centro del panel.

La Figura 8 muestra la curva de histéresis del **pórtico rehabilitado**, marcándose cuatro etapas:

1. Sin daños y hasta alcanzar un nivel de daño leve.
2. Hasta el nivel de daño moderado, existe degradación de rigidez y mayor disipación de energía, y se alcanza un valor cercano a la máxima resistencia.
3. Hasta llegar a un nivel de daño extenso, en los primeros ciclos se alcanzó la resistencia máxima del prototipo, en los posteriores se tuvo una gran caída de la resistencia la cual se mantuvo hasta finalizar esta etapa.
4. Desde el punto de daño extenso hasta el colapso, se tuvo grandes valores de desplazamiento con valores de fuerza similares en cada ciclo, evidenciando que ya no se tuvo un comportamiento monolítico en el prototipo.

El daño leve se alcanzó con pequeñas fisuras en las dos direcciones. El daño moderado se alcanzó con grietas de mayor grosor en zonas concentradas cercanas al marco. Además, se presentaron daños por desprendimiento de fragmentos. En el nivel de daño extenso ya no se presentó un aumento de agrietamiento del panel reforzado, el daño fue evidenciado por el progresivo desprendimiento del enlucido en la viga y columnas.

El ensayo cíclico se llevó hasta el ciclo número 32 con un desplazamiento de 76,80 mm (deriva del 3,20 %) y con una fuerza que ha decaído a 211 kN, en adelante se procedió con un empuje monotónico hasta un desplazamiento de 139 mm donde se evidenció la falla definitiva de columnas, desgarre de soldadura en la conexión viga columna y la rotura de pernos en el alma de la viga; además, la rotura de algunas varillas de anclaje y de la malla electrosoldada.

5.3. Curvas de capacidad

Las curvas de histéresis y de capacidad de los prototipos, obtenidas con la metodología de ASTM E2126-19 se presentan en Figura 9, donde la curva de capacidad se obtiene como la curva promedio entre los valores absolutos de las envolventes positiva y negativa del ensayo cíclico.

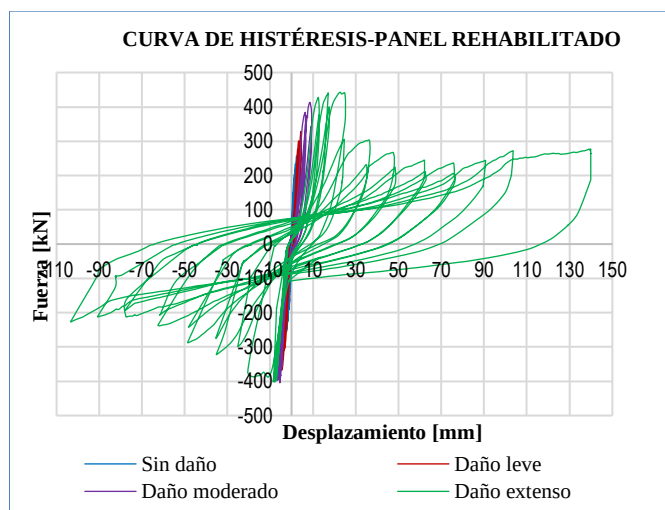


Figura 8. Curva de histéresis y niveles de daño para el pódico con panel rehabilitado

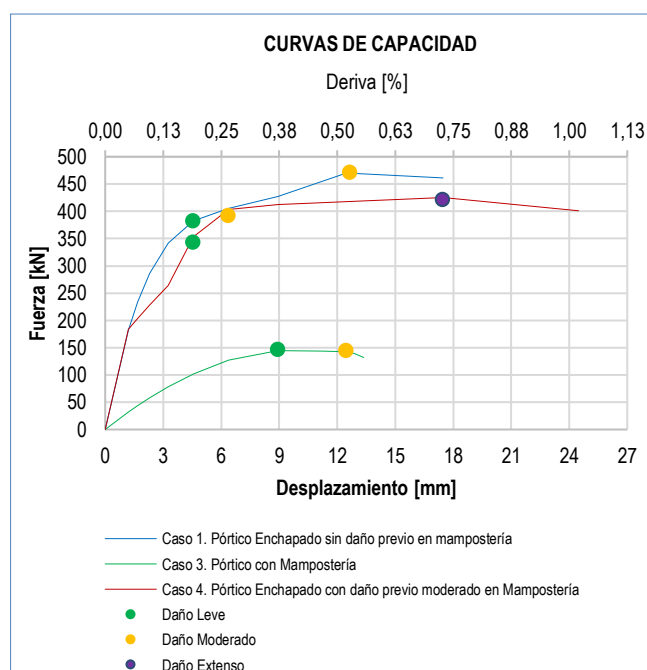
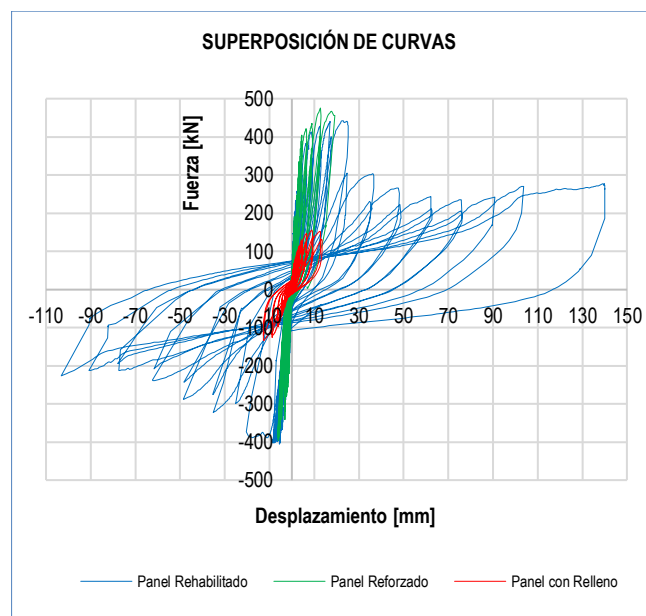


Figura 9. Curvas de histéresis y de capacidad para los prototipos ensayados

5.4. Rigidez, Ductilidad y energía disipada

En la Figura 10a, se observa la variación de rigidez.

Para determinar los parámetros de ductilidad y disipación de energía la norma ASTM E2126-19 (ASTM E2126-19, 2019) establece una metodología. En la Figura 10b, se presenta la tendencia de crecimiento exponencial de la energía disipada.

Tomando en consideración el parámetro de ductilidad (D) de los prototipos se tuvo que; el pódico reforzado presentó una mayor ductilidad de desplazamiento ($D=6,21$) que el pódico con panel de relleno ($D=2,55$), pero menor que el rehabilitado ($D=9,55$), lo cual es razonable para el panel de relleno ya que su comportamiento fue frágil, sin embargo, se esperaba que el panel reforzado presente un factor más alto que el rehabilitado, pero se explica por el hecho de que la ductilidad del primero fue limitada por la falla temprana por torsión del pódico.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

- Se observa en la Figura 9 que la curva de capacidad del pódico reforzado presenta una resistencia mayor que los otros casos, lo cual era de esperarse ya que este prototipo tuvo un reforzamiento en el panel de relleno sin daño. El pódico rehabilitado también presenta un valor de resistencia máxima cercana al anterior, lo que muestra que el reforzamiento sobre el panel de relleno con daño moderado resulta muy adecuado. Comparando la resistencia alcanzada en los ensayos entre el pódico con panel de relleno y el pódico reforzado, se evidencia un gran aumento de la misma hasta el nivel de daño moderado, este valor aumenta de 145 kN a 425 kN que representa un

aumento del 194,05% y disminuyendo la deriva en este nivel de daño de 0,52% a 0,27%.

- La Figura 10a muestra la variación de rigidez de los prototipos en los ensayos experimentales, teniéndose que la degradación de rigidez de los pórticos rehabilitado y reforzado fue muy similar en cuanto a valores y tendencia, aunque el reforzado, en los primeros ciclos, alcanza un valor de rigidez un tanto mayor. Con base en la comparación del pórtico con panel de relleno con el rehabilitado se observa una tendencia de degradación diferente. El primero disminuyó la rigidez a 9292 kN/m hasta el nivel de daño moderado y luego de reforzarlo alcanzó una rigidez de 159554 kN/m lo cual representa un aumento en 17,17 veces. Se evidencia el gran aporte de rigidez que proporciona el reforzamiento al panel de relleno con daño previo. Finalmente, al comparar el panel reforzado con el rehabilitado se puede observar que la relación de rigideces máximas muestra que la rigidez del primero es 2,93 veces la del segundo.

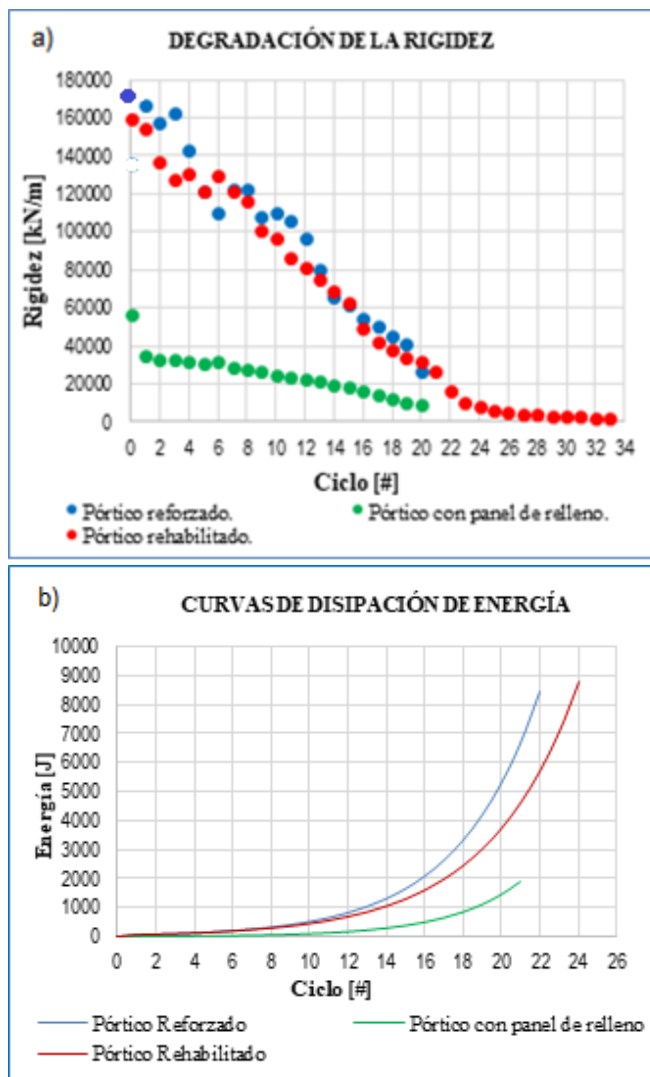


Figura 10. a) Curvas de degradación de rigidez, b) Curvas de disipación de energía

- La tendencia a crecimiento exponencial de la energía disipada de los pórticos se muestra en la Figura 10b, el panel reforzado tiende a disipar mayor energía en los últimos ciclos que en los otros. Similar a la resistencia, la disipación de energía del pórtico rehabilitado presenta una tendencia cercana a la del reforzado. Comparando la disipación de energía de ambos pórticos se puede evidenciar una gran diferencia en la tendencia de la curva, con lo cual, la ductilidad de los dos casos tiene una gran variación.
- El porcentaje de deriva al que la mampostería alcanzó el daño moderado es de aproximadamente 0,50%, este valor es alarmante debido a que normas latinoamericanas establecen valores de deriva permisibles mucho mayores; tal es el caso de Ecuador (NEC-SE-DS, 2015) en donde el porcentaje de deriva permisible para pórticos de hormigón armado y de acero estructural es del 2%. Se concluye que el valor del 2% está lejos de cumplir el objetivo de controlar los desplazamientos para limitar los daños en elementos no estructurales.
- La resistencia al corte del prototipo obtenida de forma teórica (aproximadamente 510 kN) con las ecuaciones que propone el ACI 318S-19 presenta un valor similar al obtenido de manera experimental en el pórtico reforzado (aproximadamente 471 kN). Esto pone en evidencia que el enchape absorbe el cortante casi en su totalidad y se logra así que la relación de demanda/capacidad de columnas de los pórticos disminuya, y que además, las ecuaciones para el cálculo de capacidad de muros estructurales citadas en la norma internacional son útiles para obtener un valor referente de resistencia del enchape.

AGRADECIMIENTOS

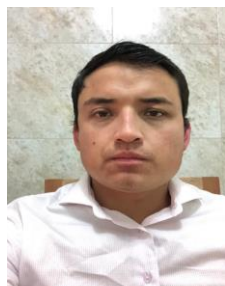
A la Escuela Politécnica Nacional, y de manera especial al Centro de Investigación de la Vivienda (CIV), al Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) y al Laboratorio de Soldadura.

REFERENCIAS

- Abdel-Hafez, L. M., Abouelezz, A. E. Y., & Elzeferay, F. F. (2014). Behavior of masonry strengthened infilled reinforced concrete frames under in-plane load. *HBRC Journal*, 11(2), 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.06.005>
- ACI 318S-19. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
- AISC 358-16. (2016). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*.
- Alcocer, S. M., Ruiz, J., Pineda, J. A., & Zepeda, J. A. (1996). Retrofitting of Confined Masonry Walls with Welded Wire Mesh. In *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1–8). Elsevier Science.
- Angulo, L. G., & López, C. E. (2008). *Reforzamiento de*

- mampostería de ladrillo artesanal. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional] BIBDIGITAL. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1069>
- ANSI/AISC 341-16. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*.
- ASTM E2126-19. (2019). *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*.
- ASTM F3125/F3125M-19. (2019). *Standard Specification for High Strength Structural Bolts and Assemblies, Steel and Alloy Steel, Heat Treated, Inch Dimensions 120 ksi and 150 ksi Minimum Tensile Strength, and Metric Dimensions 830 MPa and 1040 MPa Minimum Tensile Strength*.
- Borja, L., & Torres, M. (2015). *Diseño del Reforzamiento Estructural de un Edificio de Departamentos de 4 Plantas Ubicado en el Sector Quitumbe, Ciudad de Quito, Provincia de Pichincha*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11859>
- Crisafulli, F. J. (1997). *Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills*. [Tesis de doctorado, University of Canterbury]. BIBDIGITAL. https://www.researchgate.net/publication/29487883_Seismic_behaviour_of_reinforced_concrete_structures_with_masonry_infills/link/00b7d51f79eeb79cd000000/download
- Dawe, J. L., & Seah, C. K. (1989). Behaviour of masonry infilled steel frames. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16(6), 865–876. <https://doi.org/10.1139/l89-129>
- El-Dakhakhni, W. W., Elgaaly, M., & Hamid, A. A. (2003). Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, 129(2), 177–185. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2003\)129:2\(177\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:2(177))
- FEMA 306. (1998). *Evaluation Of Earthquake Damaged Concrete And Masonry Wall Buildings*.
- FEMA 461. (2007). *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*.
- Ghobadi, M. S., Jazany, R. A., & Farshchi, H. (2019). In situ repair technique of infill masonry walls in steel frames damaged after an earthquake. *Engineering Structures*, 178, 665–679. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.022>
- Kahrizi, M., & TahamouliRoudsari, M. (2020). Experimental study on properties of masonry infill walls connected to steel frames with different connection details. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 14(2), 165–185. <https://doi.org/10.32604/SDHM.2020.07816>
- Liu, Y., & Manesh, P. (2013). Concrete masonry infilled steel frames subjected to combined in-plane lateral and axial loading - An experimental study. *Engineering Structures*, 52, 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.038>
- Moghadam, H. A., Mohammadi, M. G., & Ghaemian, M. (2006). Experimental and analytical investigation into crack strength determination of infilled steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(12), 1341–1352. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.01.002>
- Mosquera, C. & Rosero, M. (2022) *Estudio del Reforzamiento de Mampostería de Bloque Mediante Técnica de Enchape, en Sistemas Estructurales Mixtos Acero-Hormigón con Uniones Soldadas*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22039>
- NEC-SE-DS. (2015). *Peligro sísmico diseño sismo resistente*.
- Pachano, F. A. (2018). *Determinación de parámetros mecánicos para modelos no lineales de mampostería de relleno en pórticos de hormigón armado obtenidos de manera experimental*. [Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19734>

BIOGRAFÍA



Jefferson Játiva, se graduó de ingeniero civil con mención en estructuras en la Escuela Politécnica Nacional, ha colaborado en proyectos de investigación de reforzamiento de viviendas llevados a cabo por el Centro de Investigación de la Vivienda.



Ivett Torres, se graduó de ingeniera civil con mención en estructuras en la Escuela Politécnica Nacional, ha colaborado en proyectos de investigación de reforzamiento de viviendas llevados a cabo por el Centro de Investigación de la Vivienda.



Luis Hernández, es Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental desde septiembre 2016. Ingeniero Civil graduado en 1984 en la Universidad de Camagüey, Cuba y Doctor en Ciencias Técnicas graduado en 2004 en la Universidad Tecnológica de la Habana. Profesor Universidad de Camagüey 1984 al 2015 y Universidad Lueji ANKonde, Angola 2010 al 2013. Director de Inversiones y Mantenimiento en Universidad de Camagüey 1995 hasta 2001 y 2004 hasta 2007. Premio Relevante XV Fórum Nacional de Ciencia y Técnica. Cuba. 2007. Profesional de Alto Nivel Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba. 2007. Ingeniero Residente de Obras. CISTEC. Quito. Ecuador 2015 hasta 2016. Director del Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional del 2019 a 2022.



Diego Arévalo, es Ingeniero Mecánico graduado de la Escuela Politécnica Nacional, tiene una maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional. Especialista Técnico del Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional desde el año 2015 hasta 2022

Automatización del Sistema de Deshidratación de Crudo Mediano de una Estación de Flujo

Roncero, Cristhian^{1*} ; Pomblas, Ramón² ; Salazar, José³ 

¹Universidad de Oriente. Núcleo Monagas, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Maturín, Venezuela

²Petroleos de Venezuela S.A, Gerencia Compresión Gas Oriente, Maturín, Venezuela

³Petroleos de Venezuela S.A, Gerencia AIT Punta de Mata, Maturín, Venezuela

Resumen: La industria petrolera viene experimentando cambios significativos hacia la automatización de sus procesos de exploración y producción de hidrocarburos. En ese sentido, la presente investigación se orientó a optimizar el sistema de deshidratación de Crudo Mediano de la Estación de Flujo del Complejo Operacional Amana (COA) de Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) y establecer una plataforma tecnológica confiable, eficiente y cumpla los requerimientos de COA. Se desarrolló una propuesta tecnológica que permite la visualización y control de las variables que intervienen en el Sistema de Deshidratación de Crudo Mediano de la Estación de Flujo del Complejo Operacional Amana, con la finalidad de incrementar los niveles de confiabilidad, minimizar el riesgo operacional y a su vez contribuir en la mejora de la calidad del crudo, evitando que el contenido de agua asociada al mismo disminuya su gravedad API y como consecuencia el descenso de su precio, y así, garantizar la obtención de fluidos bajo especificaciones comerciales.

Palabras clave: Automatización, Estación de Flujo, GGPIC, Sistema de Deshidratación

Automation of the Medium Crude Dehydration System of a Flow Station

Abstract: The oil industry has experienced significant changes towards the automation of its exploration and production processes of hydrocarbons. In that sense, the present investigation was oriented to optimize the medium crude oil dehydration system of the Flow Station of the Amana Operational Complex (AOC) of Petroleos de Venezuela S.A. (PDVSA) and establish a reliable, efficient technological platform and meet AOC's requirements. It was developed a technological proposal that allows the visualization and control of the variables involved in the medium crude oil dehydration system of the flow station of the Amana operational complex, in order to increase the levels of reliability, minimize the operational risk and also contribute to the improvement of the quality of crude oil, preventing the water content associated with it from decreasing its API gravity, and as a consequence, the decrease in its price, and thus guarantee the obtaining of fluids under commercial specifications.

Keywords: Automation, Flow Station, MGCIP, Dehydration System

1. INTRODUCCIÓN

El mundo tecnológico de hoy exige eficiencia en los procesos industriales, lo cual determina el grado de competitividad y la habilidad de maximizar la rentabilidad, debido a la importancia de controlar en tiempo real los recursos y procesos productivos de una empresa u organización (Roncero et al., 2023). En las industrias, se encuentran presentes procesos con repetición de tareas, por lo cual las empresas incorporan la automatización en sus procesos para obtener la mejor productividad en un tiempo limitado con menor probabilidad de error (Somavanshi et al., 2013; Inzunza et al., 2020; Basant et al., 2020). En las tendencias recientes de automatización

como Industria 4.0, las operaciones manuales están siendo reemplazadas por operaciones reconfigurables totalmente o semiocontroladas mediante la incorporación de tecnologías más avanzadas (Mendoza, 2016). La industria de procesos continuos es parte de esta tendencia mundial donde hay aspectos de la industria 4.0 que se han adaptado a las necesidades de los grandes procesos continuos como el que desarrollan las industrias petroleras que han evolucionado a paradigmas de control apoyados por las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), permitiendo un sistema de producción inteligente (Olaizola et al., 2022). En este sentido, en la industria del petróleo y gas, las diferentes actividades de producción, control y mantenimiento dependen exclusivamente de las tecnologías de la información, y solo

*croncerosm@gmail.com

Recibido: 02/03/2022

Aceptado: 06/03/2022

Publicado en línea: 01/05/2023

10.33333/rp.vol51n2.09

CC 4.0

con ellas es posible alcanzar un nivel eficiente de operación (Zawawi, & El-Sayed, 2012 y Fletcher et. al., 2019).

A nivel mundial, la industria de petróleo y gas vienen experimentando cambios significativos hacia la automatización de sus procesos de exploración y producción de hidrocarburos (Saavedra & Jiménez, 2014; Ronceros & Pomblas, 2022 y Ronceros y Pomblas, 2023). Bajo este contexto, las organizaciones deben optar por automatizar sus procesos a fin de ser más eficientes y obtener mayor rentabilidad, ya que el mercado actual cada vez es más competitivo (Basant et al., 2023; Ricopia Technologies, 2018). Bajo este contexto, la industria moderna tiene como reto principal integrar las necesidades de los clientes con las distintas tecnologías de automatización utilizadas en los procesos industriales (Acharya et al., 2018). En este sentido, la automatización de los procesos es la solución que permite que las empresas logren unos altos estándares de productividad, calidad y competitividad. A través, de la automatización de procesos, las organizaciones pueden tener un mejor funcionamiento, aumentando la eficiencia de las mismas, lo cual representa una ventaja competitiva (Farfán, 2020; Ronceros et. al, 2022). La automatización en el escenario de ingeniería significa el control o manejo de cualquier proceso para producir un bien terminado con una intervención humana mínima (Basant et. al, 2023).

Bajo este escenario, la automatización tiene gran relevancia ya que, simplifica y agiliza el trabajo asociado a la fabricación de algún determinado producto, así como también ahorrar costos asociados a la producción (JianQin et al., 2022). Al respecto Silva et al (2020) señalan que la automatización es la utilización de sistemas mecánicos electrónicos e informáticos que resuelven una actividad que se realiza repetitivamente disminuyendo la intervención de operarios o supervisores dentro de los procesos. Otro factor importante asociado a la automatización es la seguridad, debido a que existen diversos procesos que constituyen riesgos para las operaciones y la seguridad para el trabajador (Fletcher et al, 2020 y García et al., 2018). En este sentido, al realizar las operaciones de forma automática disminuye la cantidad de accidentes laborales por concepto de operaciones manuales, que se presentan en todas las industrias.

En este contexto, en Venezuela, empresas como Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA), dedicada al sector petrolero, ha sido una de las principales pioneras implementando como filosofía de procesos la instalación de sistemas automatizados, a fin de actualizarse con los grandes avances tecnológicos y aportar soluciones precisas que contribuyan con la toma de decisiones acertadas. PDVSA es la empresa que se encarga de la exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos.

PDVSA está conformada por Distritos en su estructura administrativa y operacional, distribuidos en el territorio nacional, los cuales cuentan con instalaciones especializadas para la ejecución de sus actividades relacionadas con la exploración, producción, manufactura, transporte, mercadeo, etc. Entre estos Distritos se encuentra el Distrito Punta de Mata, ubicado políticamente en el Municipio Ezequiel

Zamora, del Estado Monagas, cuya capital es la ciudad de Punta de Mata y en estos territorios se encuentra ubicado Campo Rojo.

En el Distrito Punta de Mata, se encuentran tres campos de producción petrolera como lo son: Carito, Pirital, y Travis. La Estación de Flujo Amana (NMEF – 4) se encuentra ubicada en el Centro Operativo Amana (C.O.A) de la Unidad de Producción Pirital. Está diseñada para el manejo de 200 Mil Barriles de Petróleo al Día (MBPD) de crudo y 1330 Millones de Pies Cúbicos de Gas al Día (MMPCGD). Una estación de flujo se caracteriza por tener procesos continuos a través de un conjunto de equipos interrelacionados para recibir, separar, medir, almacenar temporalmente y bombear los fluidos provenientes de los pozos adyacentes a ella, demandando el control, registro e inspección permanente de cada una de sus variables y etapas del proceso (Jaibelith, 2016).

La Estación de Flujo Amana procesa una producción proveniente de 79 sartas asociadas a 71 pozos activos de 17, 6 MBPD de la segregación Santa Bárbara – 35 con 40 °API y 8,6 % de AyS y 75,2 MBNPD de crudo Mesa – 30 con 33 °API y 4,1 % de AyS con 1263 MMPCGD. En la estación existen cuatro trenes de separación y un tren de prueba, constituidos por tres separadores horizontales ubicados en forma de cascada de tres etapas de separación (1200, 500 y 60 PSIG), el tren de prueba se utiliza para la evaluación mensual e individual de la producción (petróleo-gas) de cada pozo.

La estación tiene cuatro tanques de estabilización de crudo con capacidad de 10000 barriles (BLS) en cada uno, los cuales reciben el crudo del proceso de separación, lo almacena y estabiliza para ser bombeado posteriormente. Los vapores que se liberan de la estabilización del crudo son recolectados y enviados a seis unidades Recuperadoras de Vapor (REVA) para su comprensión y la posterior incorporación de gas al sistema de 60 LPC. Además, cuenta con un sistema de bombeo que está constituido por seis bombas centrífugas de 45 MBPD cada una, las cuales envían el crudo estabilizado en los tanques hacia el Centro de Almacenamiento y Transporte de Crudo Tejero (CATCT), antes de su salida a CATCT el crudo pasa por dos contadores de flujo másico que contabiliza el bombeo diario.

Actualmente, la Estación de Flujo Amana (NMEF – 4) se encuentra limitada para deshidratación la segregación Mesa - 30 debido a que solo se dispone de tres tanques de almacenamiento temporal, en los que el crudo no cuenta con un tiempo de residencia suficiente para que ocurra la decantación del agua suspendida; el crudo se envía hacia el Centro de Almacenamiento y Transporte de Crudo Tejero con el porcentaje de corte de agua propio del yacimiento, que se ha incrementado significativamente en los últimos años.

En vista de lo anteriormente expuesto, la presente investigación se orientó al desarrollo de una propuesta de Automatización del Sistema de Deshidratación de Crudo Mediano, de la Estación de Flujo del Complejo Operacional Amana (COA), PDVSA Distrito Punta De Mata. Tiene la finalidad de controlar y monitorear de manera constante y remota los equipos, válvulas y transmisores; desarrollando la

lógica para automatizar el sistema de deshidratación, y conocer en tiempo real los niveles de agua y crudo en los tanques, al igual que los estados de arranque y parada de las bombas y la regulación necesaria de las válvulas; y así lograr un sistema confiable, eficiente y a la altura de los requerimientos y necesidad del Complejo Operacional Amana (COA). El presente artículo se estructuró en cinco secciones: Introducción, Metodología, Resultados y Discusión, Conclusiones y Referencias.

2. METODOLOGÍA

2.1 Tipo, Nivel y Modalidad de Investigación

La investigación se enmarca dentro de la modalidad proyecto factible, ya que propone el desarrollo de una propuesta (UPEL, 2016) para la automatización del Sistema de Deshidratación de Crudo Mediano de la Estación de Flujo del Complejo Operacional Amana, con la finalidad de solucionar problemas de funcionamiento existente dentro de la estación de flujo.

2.2 Diseño Operativo

El diseño operativo se basó en las Guías de Gerencias para Proyectos de Inversión de Capital (GGPIC) desarrolladas por PDVSA, la GGPIC contiene unos lineamientos prácticos para la ejecución de un proyecto de una manera normalizada y ordenada, de modo que ningún detalle y/o paso importante se escape, y así garantizar, con un alto grado de confianza, que los proyectos sean exitosos y cumplan con los requisitos de la Corporación (GGPIC, 1999). Se enmarca en cinco fases como lo son: visualización, conceptualización, definición, implantación y operación. El proyecto solo abarcó las primeras tres fases, por tratarse de una propuesta de automatización, de tal manera que las fases de implantación y operación quedan fuera del alcance del mismo. En la Figura 1, se detallan las fases de la GGPIC y posteriormente se describe cada una de las fases adaptadas al presente proyecto.

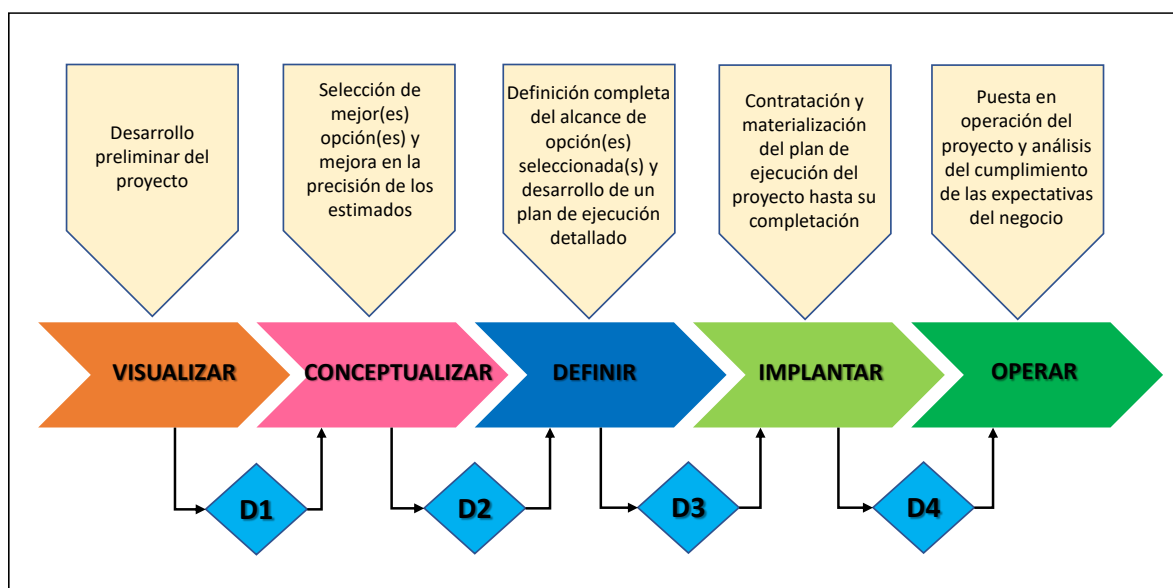


Figura 1. Metodología GGPIC

2.4.1 Fase I: Visualización

Se describen las operaciones inmersas en el sistema de deshidratación, también se verifica si el proyecto está alineado con la visión de la empresa. Las actividades que se realizaron en esta fase son:

1. Descripción del proceso de la estación de flujo del completo operacional Amana.
2. Filosofía de operación y control del sistema de deshidratación de crudo mediano de la estación de flujo Amana.

2.4.2 Fase II: Conceptualización

En esta etapa, se presentaron las probables soluciones al problema, las cuales deben cumplir con ciertos

requerimientos. Entre las actividades que se realizaron en esta fase se tiene:

1. Identificación y descripción de los requerimientos mínimos compatibles que debe tener el sistema de control diseñado para la propuesta.
2. Conocer las distintas tecnologías existentes en el mercado para realizar la automatización del sistema de deshidratación de crudo de la Estación de Flujo Amana.
3. Estudiar las técnicas preliminares de los sistemas de control.
4. Selección para la automatización del proceso de control del sistema de deshidratación de crudo de la estación de flujo del Centro Operacional Amana (COA).

2.4.3 Fase III: Definición

En esta fase se diseñó la estructura del sistema de deshidratación de crudo. Las actividades que se realizaron en esta fase son:

1. Construir el diseño de la arquitectura tecnológica a ofrecer.
2. Realizar lista de señales del sistema.
3. Construir la lógica de control en el PLC.

2.4.4 Fase IV: Implantación

Esta fase abarca el desarrollo y completación de la Ingeniería de detalle, procura de materiales, construcción y pruebas de los equipos y sistemas asociados. Para esta fase se requiere la autorización de apropiación de fondos para continuar la ejecución del proyecto.

2.4.5 Fase V: Operación

Esta etapa comprende el arranque, pruebas, estabilización y puesta en servicio de las instalaciones objeto del proyecto.

Las fases IV y V no forman parte del alcance de la presente investigación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Etapa I: Visualización

Esta primera etapa se centró en la obtención de información concerniente al sistema de deshidratación de crudo mediano de la estación de flujo, mediante el empleo de herramientas tales como: entrevistas no estructuradas y observación directa.

3.1.1. Descripción del Proceso de la Estación de Flujo del Completo Operacional Amana

En la Figura 2, se puede observar el diagrama de procesos del Centro Operacional Amana.

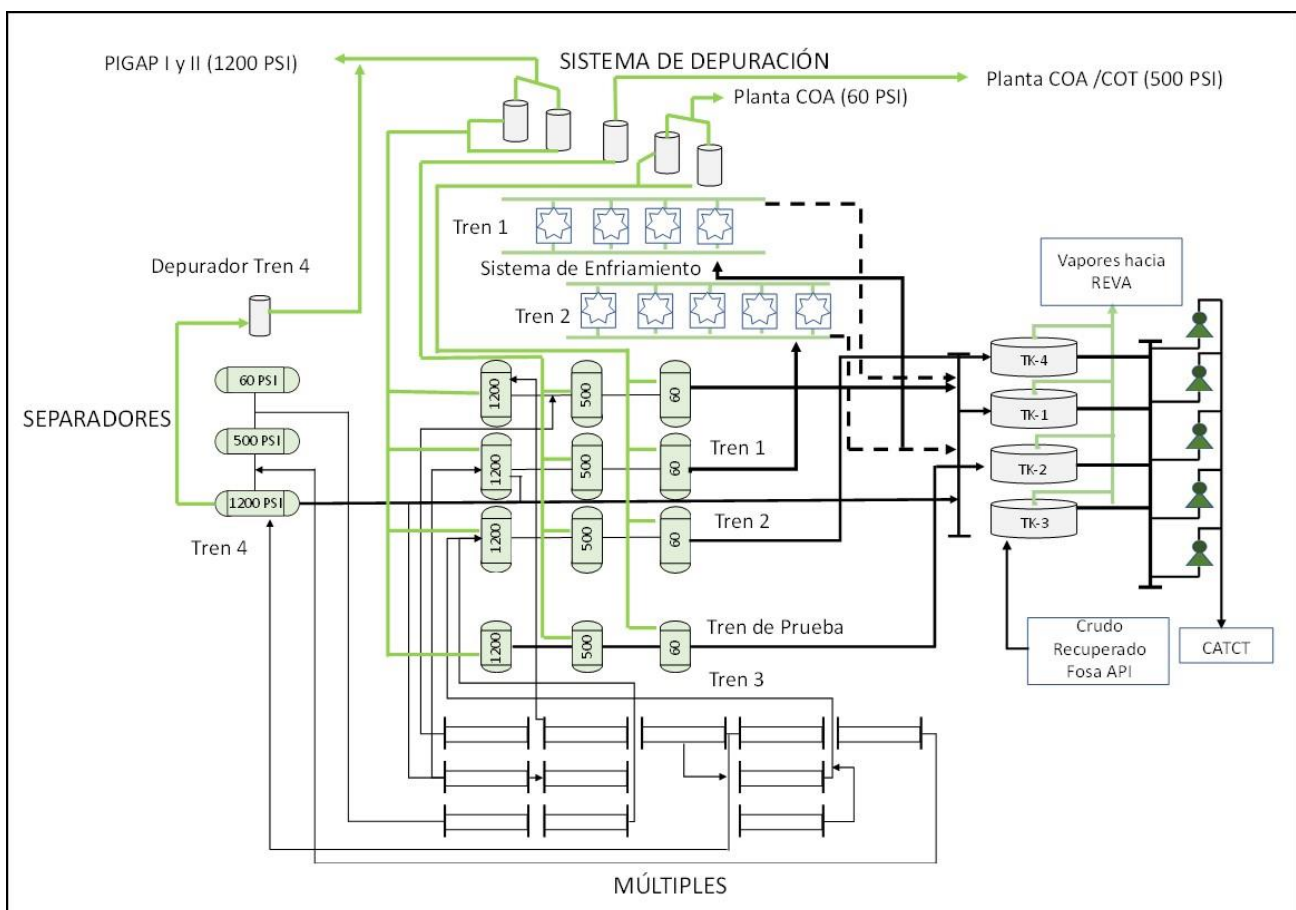


Figura 2. Diagrama de Procesos del Centro Operacional Amana

Las mezclas de crudo-gas son recibidas en los múltiples de producción, posteriormente es enviado a los trenes de producción conformados por separadores de alta, media y baja presión. Posteriormente, el gas separado es transferido a los depuradores de igual nivel operacional, para luego ser enviado

al complejo Muscar y a la planta compresora, mientras el crudo pasa a ser almacenado en los tanques de la estación y de allí bombeados al Patio de Tanques Travieso.

La mezcla de alta presión procedente de los múltiples se transfiere a los separadores (S-01/04/07/10) de 1200 psig y la

corriente de crudo de fondo de los mismo es enviada mediante las válvulas de control de nivel (LCV-210A/B, LCV-310A/B, LCV-410A/B/C, LCV-510A/B/C) a los separadores (S-02/05/08/11) de 500 psig, que a su vez reciben mezcla bifásica (crudo – gas) desde los múltiple de producción de ese nivel. Posteriormente, la corriente de fondo de los separadores (S-02/05/08/11) de 500 psig, es dirigida mediante la válvula de control de nivel (LCV-220A/B, LCV-320A/B, LCV-420A/C, LCV-520A/B/C) a los separadores (S-03/06/09/12) de 60 psig.

El crudo de salida de los separadores de 60 psig, mediante las válvulas de control de nivel (LCV-230A/B, LCV-330A/B, LCV-430A/C, LCV-530A/B/C) es transferido a los tanques de almacenamiento de la estación (TK-01/02/03/04), los separadores S-06/12 de los trenes 03 y 06, disponen de la facilidad de enfriamiento del crudo antes del almacenamiento. El crudo es enviado a los tanques, mediante bombeo (B-01/02/03/04/05) hacia el Patio de Tanques Travieso (PTT), mientras que los vapores son comprimidos en unidades de recuperación de vapores (REVAS).

El gas de salida de los separadores (S-01/04/07/10) de 1200 psig es enviado hacia los depuradores verticales (D-1A/2A/3A) de alta presión (1200 psig), donde se remueve cualquier residuo de líquido producido por cambios de temperatura o arrastre desde los trenes de separación, y posteriormente se dirige a través del gasoducto C.O.A.– Muscar al Complejo Muscar. El gas de salida de los separadores de 500 psig y de 60 psig es enviado a los depuradores correspondientes de media (D-4A) y de baja presión (D-5A/6B), el antiguo depurador B de 1200 psi, pasó a proceso de depuración de 500 psi, para luego ser enviado a C.O.A Planta, donde es comprimido hasta 1200 psig y enviado hacia el Complejo Muscar.

La mayoría de los equipos de procesos de la estación (separadores, depuradores, bombas) poseen indicadores locales de presión y temperatura de operación y en el caso de los separadores y depuradores poseen adicionalmente visores de nivel, donde se puede apreciar la altura de operación del líquido dentro de los recipientes.

3.1.2 Filosofía de Operación y Control del Sistema de Deshidratación de Crudo Mediano de la Estación de Flujo Amana

El proceso de deshidratación de crudo se inicia en los degasificadores V-4301A/B, los cuales reciben la corriente de fluido multifásico (crudo-gas-agua) procedente de los separadores de producción de baja presión correspondientes a los trenes de producción, con un contenido de agua de 4%. En los degasificadores se separa el gas del crudo a una presión 18 in. WC y a 120 °F. Estos equipos son recipientes verticales elevados, cada uno adosado a los tanques de lavado T-4301A/B. El líquido del fondo de los degasificadores conformado por una mezcla agua-crudo, desciende por una tubería conectada hacia los tanques de lavado T-4301A/B a una presión de 20 psig y 120 °F.

El gas separado sale por el tope de los degasificadores y es enviado al cabezal (tubería) recolector de la fase gaseosa de los tanques de lavado T-4301A/B, desde donde se deriva hacia las recuperadoras de vapor (REVA) de la Estación de Flujo Amana, por seguridad de las instalaciones los gases pasan a través de un sistema de arrestallamas ubicadas en las líneas de descarga de gas de los tanques de lavado (T-4301A/B). Los tanques de lavado son tipo doble barril concéntrico, contienen un tanque interno y un barril externo o tanque anular. En el barril externo, la corriente de crudo y agua entra por la parte inferior. Iniciada la operación, el agua libre va decantando en el fondo del tanque externo, y forma una capa que permite el lavado del crudo ascendente, que por efectos de la polaridad del medio circundante produce la coalescencia y posterior sedimentación del agua que está presente en el crudo.

El líquido, agua y crudo, es transferido por gravedad desde el fondo de los degasificadores hasta el tanque de lavado; la mezcla fluye a través de un sistema de distribución interno que permite mantener un flujo uniforme bien distribuido en la entrada al tanque de lavado se han instalado deflectores internos que disminuyen la turbulencia localizada de la mezcla. Debido a la diferencia de densidad entre el agua y el crudo más el efecto de la ruptura de la emulsión por el agente químico demulsificante, y la combinación de mecanismos de coalescencia y sedimentación, se realiza la separación de ambos compuestos quedando en el fondo el agua por ser más pesada y el crudo separado fluye hacia la superficie atravesando una interfase compleja compuesta de crudo y agua que se forma entre el agua en el fondo y el crudo en el tope del tanque anular, el nivel de esta interfase se detecta mediante los interruptores indicadores de nivel que controlan el nivel de agua arrancando o parando las bombas de agua de efluente (P-0102 A/B/C).

El agua separada es enviada hacia el tanque de almacenamiento de efluentes T-4302 mediante la bomba P0102 A/B/C y de allí se envía a la planta de tratamiento MUD-10 mediante el sistema de bombeo existente constituido por las bombas P-4003 A/B/C. El crudo que asciende por la interfase se rebosa por encima del tanque interno, cuando se tiene un alto nivel se activa la bomba de transferencia de crudo Deshidratado P-0101 A/B/C enviando la producción hacia el cabezal de despacho de crudo que alimenta los tanques estabilizadores existentes. Operacionalmente, debe mantenerse al menos un tanque de estabilización disponible para recibir el crudo deshidratado proveniente de los tanques de lavado.

3.2 Etapa II: Conceptualización

En esta fase, se procedió a realizar la evaluación tecnológica, para la selección de la arquitectura de control que dé respuestas satisfactorias a todos los requerimientos del Sistema de Deshidratación de Flujo Mediano de la Estación de Flujo del COA, a fin de lograrse su optimización.

3.2.1. Requerimientos Mínimos que debe tener el Sistema de Control a Proponer.

Los controladores lógicos programables (PLC) automatizan el control y la supervisión de los procesos físicos industriales y de infraestructura, como la generación de energía, las tuberías de gas y los diferentes procesos propios de la industria petrolera (Ahmed et al., 2017), razón por la cual el sistema de control es el equipo más importante en la propuesta a realizar, debido a que este determina los demás equipos que conformaran la arquitectura tecnológica y el tipo de red a implantar. Los requerimientos mínimos considerados para el sistema de control propuesto fueron los siguientes:

- Compatibilidad con el protocolo MODBUS.
- Seguridad mínima SIL 2
- Diseño Modular
- Control Funcional
- Control de Procesos Escalables
- Soporte Técnico
- Destrezas técnicas del personal
- Costos

3.2.2. Tecnologías Disponibles en el Mercado para Realizar la Automatización del Sistema de Control

Es importante señalar que, para la realización del estudio de mercado, se consideraron exclusivamente los sistemas de control que se utilizan actualmente en la plataforma PDVSA. Los modelos de sistemas de control a considerar son: Emerson Process Managemet, Shneider Electric, Rockwell Automation, Smart y Aeti. En este sentido, se seleccionaron los equipos Modicon Quantum, Simatic S7 y Controllogix para la realización de la evaluación y análisis técnico preliminar de los sistemas de control. Los sistemas de control seleccionados para la evaluación presentan las siguientes características:

Modicon Quantum (Shneider): Al ofrecer una amplia gama de procesadores, Modicon Quantum se adapta perfectamente a procesos complejos. El poder de sus procesadores optimiza los tiempos de los ciclos y a la vez integra cada vez más funciones de comunicación, diagnóstico, flexibilidad de memoria y almacenamiento de datos. Es ideal para control de procesos complejos y posee las siguientes características:

- Idiomas IEC como estándar: LD, ST, FBD, SFC, IL
- Sistema multitarea de alto nivel
- Capacidad de memoria de hasta 7 Mb utilizando extensiones PCMCIA
- Especialmente configurado para aplicaciones de control de procesos con módulos de recubrimientos conformados, E/S intrínsecamente seguras y un amplio catálogo de módulos asociados.
- Procesadores de seguridad y módulos de E/S
- Soluciones en espera activa de alto rendimiento y uso inmediato con teclado de LCD para monitoreo local.

- Numerosos puertos integrados (puerto ISB, puerto Ethernet TCP/IP con servidor Web, Modbus Plus y al menos un puerto en serie Modbus) en el panel frontal.
- Conectividad en bastidor a Profibus-DP.

Simatic. El simatic es un sistema de automatización universal, concebido para todos los sectores industriales constituye una solución óptima para aplicaciones en arquitecturas de control centralizadas y descentralizadas, permite el uso de una amplia gama de buses de campo, tales como AS-Interface, Profibus-DP y Ethernet. El entorno de programación STEP 7 pone a disposición todos los lenguajes industriales de programación de PLC: STL, LDR, FCH, STEP 7-SCL, STEP 7-GRAH, STEP 7-HiGraph. Los controladores modulares simatic pueden ampliarse de forma flexible en cualquier momento a través de módulos de comunicación enchufables I/O, funcional y, proporcionando soluciones a medida para sus necesidades. El PLC modular también se presenta como sistemas de alta disponibilidad o prueba de fallos. Estos presentan las siguientes características:

- Puerto estándar RS-485 con velocidad de transferencia de datos comprendida entre 1,2 y 187,5 Kbits/s.
- Conexión a Ethernet vía módulo dedicado
- Estándar Windows

ControlLogix. ControlLogix usa un motor de control común con un ambiente de desarrollo común para proporcionar alto rendimiento en un ambiente fácil de usar. La estrecha integración entre el software de programación, el controlador y los módulos de E/S reduce el tiempo de desarrollo y el costo en la puesta en marcha y durante la operación normal. Puede realizar control estándar y de seguridad en el mismo chasis en un sistema verdaderamente integrado. Este modelo posee las siguientes características:

- Proporciona un control de aplicaciones de alta velocidad, de alto rendimiento y multidisciplinario.
- Proporciona una arquitectura de controladores completamente redundante con conmutación sin perturbaciones y alta disponibilidad.
- Proporciona comunicaciones de redes modulares y escalables.
- Ofrece un rango de comunicación de difusión y opciones de E/S.
- Proporciona capacidades de sincronización de tiempo para el primer fallo, el secuenciamiento de procesos y otras aplicaciones.
- Ofrece algunos productos con certificación TÜV para uso en aplicaciones SIL 2 y SIL 3.

3.2.3. Evaluación Técnica Preliminar del Sistema de Control

En esta etapa, se realizó la evaluación técnica, tomando en consideración ciertos parámetros. Los pasos a considerar para la elaboración de la matriz comparativa fueron:

- Cada criterio se asoció con una letra correspondiente, es decir, la fila A representa el criterio A, la fila B corresponde al criterio B, y así sucesivamente.
- Posteriormente, se asignó un peso a cada criterio, seleccionando el grado de importancia del criterio (1:Ninguna; 2:Baja; 3:Media; 4:Alta), el cual se coloca en la casilla respectiva del valor de comparación.
- Después de vaciar la matriz de todas las comparaciones, se sumaron los puntos de cada

criterio y se ponderó cada uno de ellos, los cuales tienen un peso de 1 a 10, donde 1 es el mínimo y 10 el máximo.

- En la parte inferior de la matriz, se colocó cada una de las opciones estudiadas, un rango de números del 1 al 5 para indicar si la tecnología es adecuada para cumplir con los criterios de evaluación, como se muestra en la Figura 3.

PROYECTO: Automatización del Sistema de Deshidratación de Crudo Mediano de una Estación de Flujo									
CRITERIOS DE EVALUACIÓN		GRADO DE IMPORTANCIA							
		4 Alto				3 Mediano			
		2 Bajo				1 Ninguno			
A	Compatibilidad con el proceso MODBUS								
B	Seguridad	3B	4A						
C	Diseño modular	4B	4A	4A					
D	Control funcional	4C	4B	3A	4A				
E	Control de Procesos escalable	2E	4C	4B	4B	3A			
F	Soporte técnico	4F	3F	2F	2B	4A			
G	Destrezas técnicas del persona	3G	4G	3G	3C	2B			
H	Costos	4G	2F	3D					
		A	B	C	D	E	F	G	H
MATRIZ DE OPCIONES	Resultados de la ponderación	2	17	11	2	3	11	25	22
	Peso del 1 al 10	1	8	5	1	2	5	10	9
1	Modicon Quantum	4	3	4	4	4	5	5	5
		4	23	20	4	6	25	50	45
2	Simatic	3	3	4	4	4	5	5	4
		3	23	20	4	5	25	50	36
3	ControlLogix	4	5	5	4	5	5	5	5
		4	39	25	4	7	25	50	45
		TOTAL							

Figura 3. Matriz de selección de sistema de control

Considerando las puntuaciones totalizadas en la matriz de selección del sistema de control, en la Figura 2, se observa que el Controllogix tiene una puntuación de 199, el Modicon Quantum una puntuación de 177 y el Simatic una puntuación de 166. Sobre la base de la comparación descrita, queda demostrado que el PLC Controllogix, es la mejor opción que se ajusta a las exigencias planteadas, debido a que obtuvo la mayor puntuación con 199 puntos, y obtuvo una ventaja de 22 puntos sobre el PLC Modicon Quantum de Shneider Electric y 33 puntos sobre el Simatic.

3.2.4. Selección de las tecnologías a implantar para la arquitectura de control del sistema de Deshidratación de crudo mediano de la Estación de Flujo de COA.

Para seleccionar los equipos del Rack principal del PLC, se empleó el manual técnico del fabricante 1756-SG001G-EN-P Control Logix Selection Guide. También, se tomó en

consideración los equipos, partes y repuestos existentes en los almacenes y depósitos de la empresa. Los puntos a considerar para la selección de los equipos que son parte del chasis del PLC controllogix son los siguientes:

Selección del Controlador. En el área estudiada, se realizan operaciones de supervisión donde se manejan aproximadamente 120 señales, lo que nos indicó que el controlador a proponer no requiere de grandes capacidades de memoria. En consideración a lo afirmado anteriormente, se deduce que el controlador 1756-L61, que tiene 2 Mb de memoria, se identifica como un PLC de gama media; con las cualidades requeridas para satisfacer las exigencias de proceso y control del área en estudio.

Selección del chasis. El sistema ControlLogix es un sistema modular que requiere un chasis de I/O 1756, el cual contiene los diversos módulos instalados en él. Con base en los chasis

ControlLogix ofertadas en el mercado y a la cantidad de tarjetas necesarias para lograr la comunicación de los instrumentos de campo hacia el SCADA, se procedió a seleccionar el chasis 1756-A7 de siete slots, los cuales son suficientes para albergar las tarjetas necesarias para la comunicación y el procedimiento.

Selección de la fuente de alimentación. La fuente de alimentación eléctrica se usa con los chasis 1756 ControlLogix para proporcionar 1.2 V, 3.3 V, 5 V y 24 V de corriente continua directamente al Backplane del chasis. En este caso, el chasis seleccionado es un chasis 1756-A7 de la serie B.

Selección de la red de comunicaciones. Las redes de la arquitectura NetLinx(DeviceNet, ControlNet y EtherNet/IP), hablan un lenguaje común y comparten un conjunto universal de servicios de comunicación, debido a que la arquitectura integra a la perfección todos los componentes de un sistema de automatización en una red de múltiples dispositivos o en múltiples redes, incluyendo el acceso a internet, que ayuda a mejorar la flexibilidad, reduce los costos de instalación e incrementa la productividad. En este sentido, las características que debe poseer la red de comunicación a proponer son las siguientes:

- Velocidad de Transmisión
- Pericia del Personal
- Robustez
- Soporte Técnico
- Repuestos existentes en el almacén
- Programación de la Red
- Cantidad de Dispositivos que se pueden conectar a la red

Las redes disponibles para los sistemas ControlLogix son: Ethernet/IP, ControlNet, y DeviceNet. Estas son compatibles con la tecnología de Allen Bradley y se pueden implementar a nivel de campo, por lo cual se hizo necesario realizar una evaluación de los mismos para seleccionar entre ellos cual es el tipo de red adecuado para interconectar los equipos de adquisición de datos remotos que se instalarían en campo con el PLC. La arquitectura seleccionada fue la de red Controlnet.

Selección del software. El software seleccionado fue RSLOGIX 5000 con una versión de firmware 19, además posee las facilidades de programar en Ladder, texto estructurado, diagrama de bloques funcionales y diagrama de bloques secuenciales y RslinxClassic Professional.

Ubicación de las tarjetas en el chasis. Las tarjetas que forman parte del chasis del PLC, se seleccionaron teniendo en cuenta el tipo de red para la adquisición de datos remotos, además de tener en consideración que se trata de un módulo de entradas y salidas (I/O), ya que el chasis principal alberga el procesador. Razón por la cual el chasis del PLC albergará la tarjeta de redControlNet y las tarjetas de entrada y salidas (I/O).

3.3 Etapa III: Definición

En esta fase se elaboró el diseño de la arquitectura tecnológica para el sistema automatizado a proponer, tomando en cuenta las tecnologías seleccionadas.

3.3.1 Diseño de la Arquitectura Tecnológica a Proponer

Una vez seleccionado el sistema de control que cumple con los requerimientos necesarios para garantizar la supervisión y control de los procesos que se llevan a cabo en el sistema de Deshidratación, así como el tipo de red de comunicación, y los módulos I/O, se procedió a la elaboración del diseño de la arquitectura tecnológica. En la arquitectura propuesta las señales provenientes de los instrumentos se trasladan a los gabinetes instalados a través de la red, y se distribuyen de acuerdo a los diagramas de conexonado, en los cuales se muestra a manera de diagrama de ubicación del cableado de las señales. Una vez en los gabinetes instalados, las señales llegan al módulo I/O ControlLogix y de ahí se dirigen por la redControlNet, que llega al PLC principal que alberga el procesador, del mismo parte por la red Ethernet al Switch Industrial Ethernet Modelo WS-C3560G marca Cisco, que contiene 24 puertos Ethernet y 4 puertos ópticos y será el Switch que establecerá la comunicación entre los gabinetes con el HMI SCADA. En la Figura 4 se puede observar la arquitectura de control.

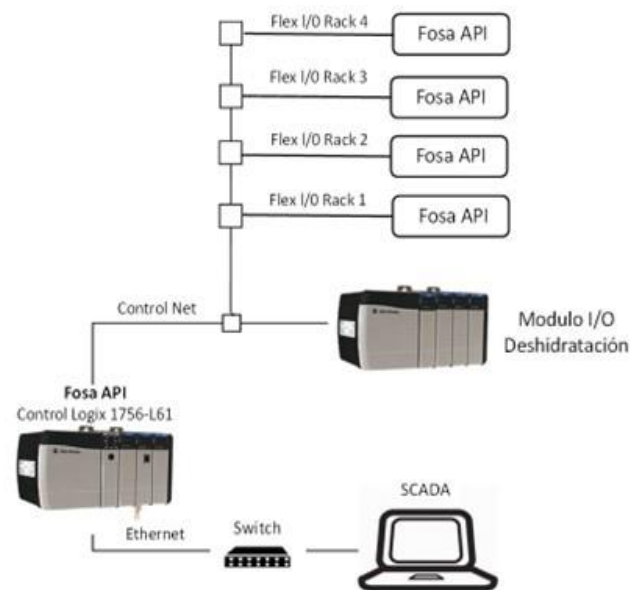


Figura 4. Arquitectura de control

3.3.2 Diseño de la Lógica de Programación a Implantar.

En esta parte, se realizó la lógica de control que será la base para el funcionamiento correcto del sistema de control, para lo cual se tomará como referencia la arquitectura de control; la programación del PLC ControlLogix se realizó en el lenguaje de bloques funcionales, lenguaje ladder o escalera y lenguaje de texto estructurado. Primeramente, se dio inicio al software RsLogix 5000, el cual está diseñado para la programación de controladores de la familia Logix 5000 y para la plataforma Logix de Rockwell Automation; una vez iniciado el software se procedió a crear el nuevo proyecto donde se especificó: el

tipo de procesador a utilizar, el nombre del proyecto, el tipo de chasis y la ubicación del procesador en el chasis. Ya creado el proyecto, el siguiente paso consistió en la creación de los módulos de entrada y salida E/S o configuración de las tarjetas de comunicación y módulos I/O, que se utilizan en la aplicación del control, dicha configuración se realizó tomando en cuenta los nombres y Slot en donde irán conectados los diferentes módulos. Luego de tener configuradas todas las tarjetas y los módulos de comunicación necesarios para la ejecución del presente proyecto, se procede a crear las rutinas y subrutinas que contendrá la lógica del PLC, para así cumplir todas las funciones requeridas y de esta forma satisfacer las necesidades demandadas por la Gerencia de Operaciones.

Configuración del software de comunicación RSLinx para la comunicación del PLC. El software RSLinx permite la configuración de los drivers de los distintos módulos de comunicación y del puerto RS232, además, facilita la visualización de las redes a las que se conecta el autómatas. RSLinx ofrece la posibilidad de visualizar el estado de las distintas conexiones y proporciona información sobre el proceso de carga y descarga de programas.

Elaboración de la lista de señales del sistema. El primer paso realizado en este procedimiento fue identificar todas las entradas y salidas; se realizó la asignación de estas a las tarjetas ubicadas en modulo I/O, además de relacionar los tags a las mismas. A continuación, en la Tabla 1 se describe el listado de las señales digitales y analógicas a utilizar en el nuevo sistema:

Tabla 1. Entradas digitales (Desh) y analógicas (Hart)

Dirección PLC	Descripción	Tag
Desh:1:I.Data.0	Bomba de Crudo P0101A Encendida	P0101A_ON
Desh:1:I.Data.1	Bomba de Crudo P0101B Encendida	P0101B_ON
Desh:1:I.Data.2	Bomba de Crudo P0101C Encendida	P0101C_ON
Desh:1:I.Data.3	Bomba de Crudo P0101A Apagada	P0101A_OFF
Desh:1:I.Data.4	Bomba de Crudo P0101B Apagada	P0101B_OFF
Desh:1:I.Data.5	Bomba de Crudo P0101C Apagada	P0101C_OFF
Desh:1:I.Data.6	Bomba de Agua P0102A Encendida	P0102A_ON
Desh:1:I.Data.7	Bomba de Agua P0102B Encendida	P0102B_ON
Desh:1:I.Data.8	Bomba de Agua P0102C Encendida	P0102C_ON
Desh:2:I.Data.0	Estado Local/Remoto de la Bomba de Agua P0102B	HS_P0102B
Desh:2:I.Data.3	Estado de Alarma de Sobre Carga de la Bomba de Crudo P0101B	OL_P0101B
Desh:2:I.Data.4	Estado de Alarma de Sobre Carga de la Bomba de Crudo P0101C	OL_P0101C
Desh:2:I.Data.5	Estado de Alarma de Sobre Carga de la Bomba de Agua P0102A	OL_P0102A
Desh:2:I.Data.6	Estado de Alarma de Sobre Carga de la Bomba de Agua P0102B	OL_P0102B

Tabla 1 (cont.). Entradas digitales (Desh) y analógicas (Hart)		
Dirección PLC	Descripción	Tag
Desh:2:I.Data.7	Estado Cerrada de la Válvula YV 010420	ZIL_010420
Desh:2:I.Data.8	Estado Abierta de la Válvula YV 010420	ZIH_010420
Desh:2:I.Data.9	Intruso en Gabinete I/O de Deshidratación	Intruso_Desh
Desh:2:I.Data.10	Alta Presión de Descarga de la Bomba de Crudo P0101B	PSH_010220
Desh:2:I.Data.11	Alta Presión de Descarga de la Bomba de Crudo P0101C	PSH_010320
Desh:2:I.Data.13	Baja Presión de Succión de la Bomba de Crudo P0101B	PSLL_010210
Desh:2:I.Data.14	Baja Presión de Succión de la Bomba de Crudo P0101C	PSLL_010310
HART1Module_1.A uto_Poll[0].PV_valu e	Transmisor de Presión de Descarga de la Bomba de Crudo P0101A	PIT_010120
HART1Module_1.A uto_Poll[1].PV_valu e	Transmisor de Presión de Succión de la Bomba de Crudo P0101A	PIT_010110
HART1Module_1.A uto_Poll[2].PV_valu e	Transmisor de Presión Diferencial de la Bomba de Crudo P0101A	PDIT_010110
HART1Module_1.A uto_Poll[3].PV_valu e	Transmisor de Presión de Descarga de la Bomba de Crudo P0101B	PIT_010220
HART1Module_1.A uto_Poll[4].PV_valu e	Transmisor de Presión de Succión de la Bomba de Crudo P0101B	PIT_010210
HART1Module_1.A uto_Poll[8].PV_valu e	Transmisor de Presión Diferencial de la Bomba de Crudo P0101C	PDIT_010310
HART4Module_1.A uto_Poll[2].PV_valu e	Transmisor de Nivel de Crudo del TK 4301A Interno	LIT_640111_C R
HART4Module_1.A uto_Poll[0].PV_valu e	Transmisor de Nivel de Crudo del TK 4301A Externo	LIT_640110_C R
HART4Module_1.A uto_Poll[2].TV_valu e	Transmisor de Nivel Total del TK 4301A Interno	LIT_640111_T
HART4Module_1.A uto_Poll[0].SV_valu e	Transmisor de Nivel de Agua del TK 4301A Externo	LIT_640110_A G
HART4Module_1.A uto_Poll[3].PV_valu e	Transmisor de Flujo del TK 4301 ^a	FIT_420110
HART4Module_1.A uto_Poll[4].PV_valu e	Transmisor de Nivel de Crudo del TK 4301B Interno	LIT_640211_C R
HART4Module_1.A uto_Poll[5].PV_valu e	Transmisor de Nivel de Crudo del TK 4301B Externo	LIT_640210_C R
HART4Module_1.A uto_Poll[4].TV_valu e	Transmisor de Nivel Total del TK 4301B Interno	LIT_640211_T
HART4Module_1.A uto_Poll[5].TV_valu e	Transmisor de Nivel Total del TK 4301B Externo	LIT_640210_T
HART4Module_1.A uto_Poll[4].SV_valu e	Transmisor de Nivel de Agua del TK 4301B Interno	LIT_640211_A G
HART4Module_1.A uto_Poll[6].PV_valu e	Transmisor de Temperatura del TK 4301B	TIT_640210

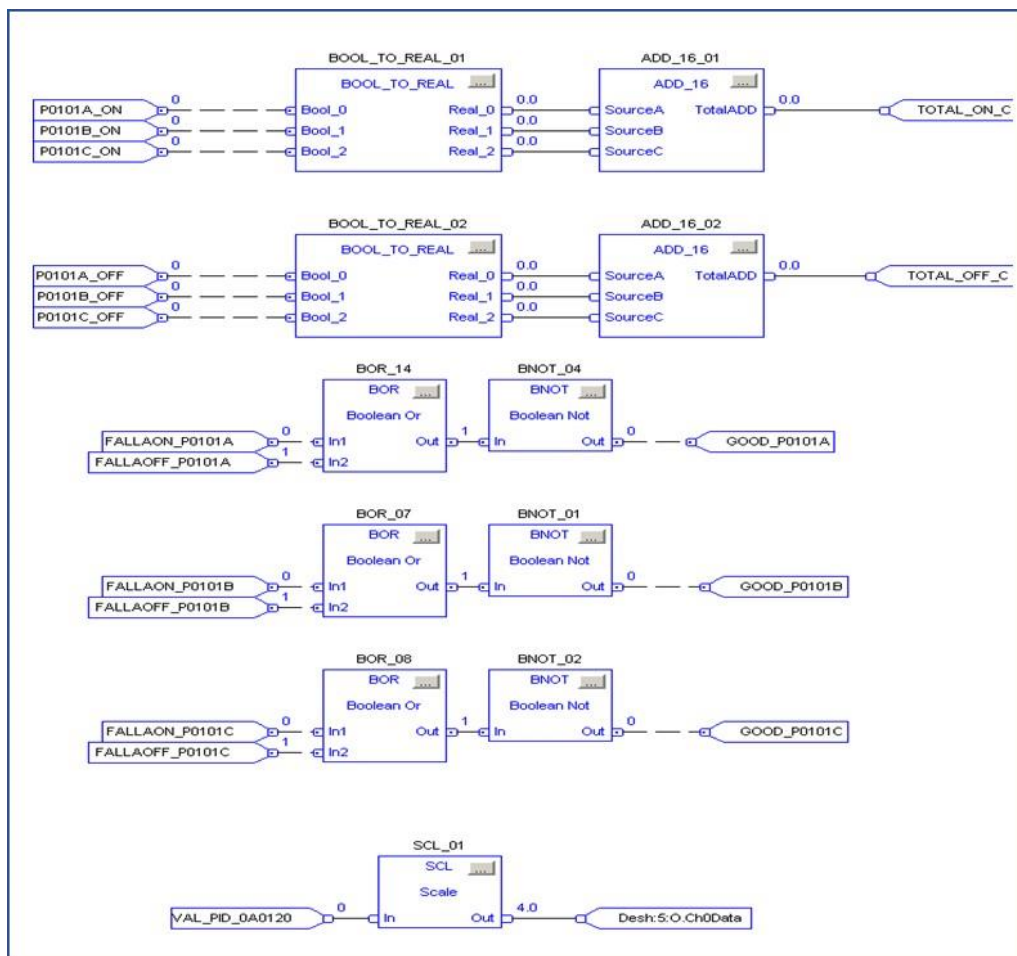
Tabla 1 (cont.). Entradas digitales (Desh) y analógicas (Hart)

Dirección PLC	Descripción	Tag
HART4Module_1.A uto_Poll[7].PV_valu e	Transmisor de Flujo del TK 4301B	FIT_420210
HART3Module_1.A uto_Poll[0].PV_valu e	Transmisor de Presión de Descarga de la Bomba de Agua P0102A	PIT_010420
HART3Module_1.A uto_Poll[4].PV_valu e	Transmisor de Presión de Succión de la Bomba de Agua P0102B	PIT_010510
HART3Module_1.A uto_Poll[7].PV_valu e	Transmisor de Presión de Succión de la Bomba de Agua P0102C	PIT_010610
HART3Module_1.A uto_Poll[8].PV_valu e	Transmisor de Presión Diferencial de la Bomba de Agua P0102C	PDIT_010610
HART1Module_1.A uto_Poll[7].PV_valu e	Transmisor de Nivel de Agua del TK 4302	LIT_300110
HART2Module_1.A uto_Poll[14].PV_val ue	Analizador de Salida del Múltiple de Aguas de Efluentes	AIT_001910
HART3Module_1.A uto_Poll[0].PV_valu e	Analizador de Salida del Múltiple de Descarga de Agua	AIT_010420.in
HART3Module_1.A uto_Poll[2].PV_valu e	Analizador de Salida del Múltiple de Descarga de Crudo	AIT_010120.in

Elaboración de la lógica de control que cumpla con las nuevas especificaciones presentadas. Una vez configurados

todos los módulos de comunicación, las tarjetas de entrada y salida, y de crear las rutinas y subrutinas, los tags asociados al proyecto para satisfacer las necesidades, se procedió a diseñar la lógica de programación. Para esto se comienza a crear la lógica en las rutinas: BOMBAS_AGUA_DESHIDRATACIÓN y BOMBAS_CRUDO_DESHIDRATACIÓN, bajo el lenguaje gráfico diagrama de bloques funcionales, al igual que la rutina MOVIMIENTO_DATOS en el lenguaje de texto estructurado, y en lenguaje ladder se realizó la rutina de CONTROL_VALV_PID. El primer paso realizado en este procedimiento fue identificar todas las señales a utilizar, se realizó la lógica para las rutinas BOMBAS_AGUA_DESHIDRATACIÓN y BOMBAS_CRUDO_DESHIDRATACIÓN.

En la Figura 5, se observan las rutinas del control de la cantidad de bombas que se encuentran en estado de encendido o apagado (ON/OFF) por sala de bombas, también si las bombas se encuentran en estado de falla, esto a través de un bloque de instrucción Bool_To_Real, con unas entradas de tipo booleano y unas salidas de tipo real luego estas salidas se convierten en entrada que van a un bloque de adición (ADD), de igual forma para contabilizar las bombas que se encuentran en estado de apagado.

**Figura 5.** Cantidad de bombas de crudo deshidratación

En las Figuras 6 y 7, se observa la rutina que va a indicar cuantas bombas necesita encendidas o a pagadas de acuerdo a los niveles de los tanques, los cuales son unos de los parámetros para que estas enciendan o apaguen las bombas, en esta se utilizaron bloques de instrucciones de control de niveles de tanques (TANK_CONTROL_HIGH y

TANK_CONTROL_LOW) cuyas salidas van a ser las entradas en bloques para cambiar datos de tipo booleano a real (BOOL_TO_REAL), para luego la salida de estos ser las entradas del bloque de adición (ADD) para contar cuantas bombas necesita la secuencia encender o apagar.

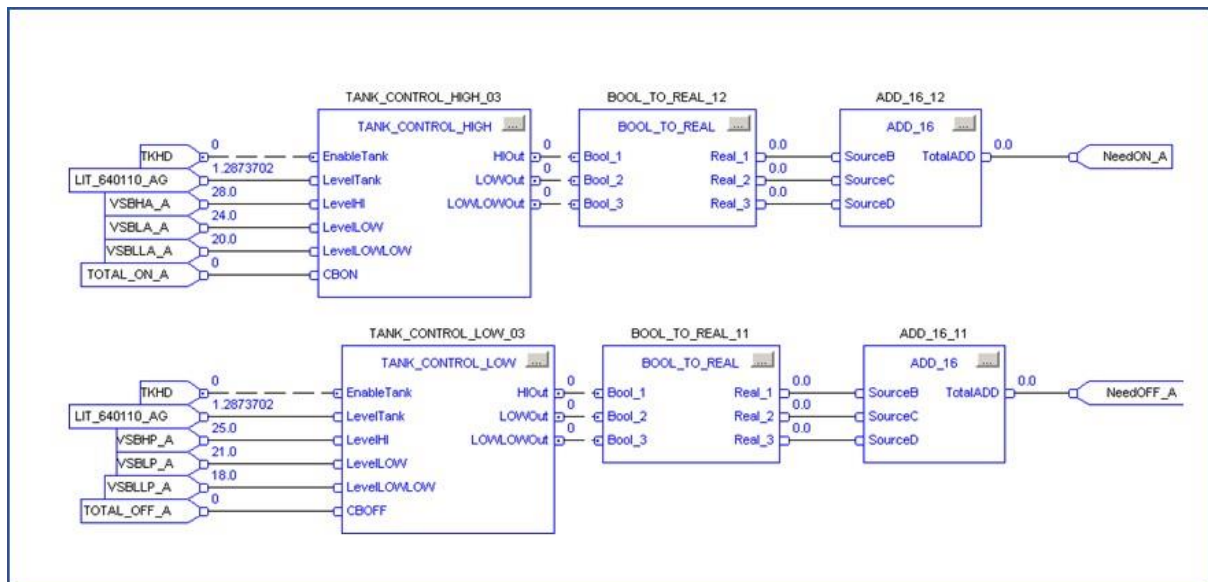


Figura 6. Nivel de arranque/parada agua deshidratación

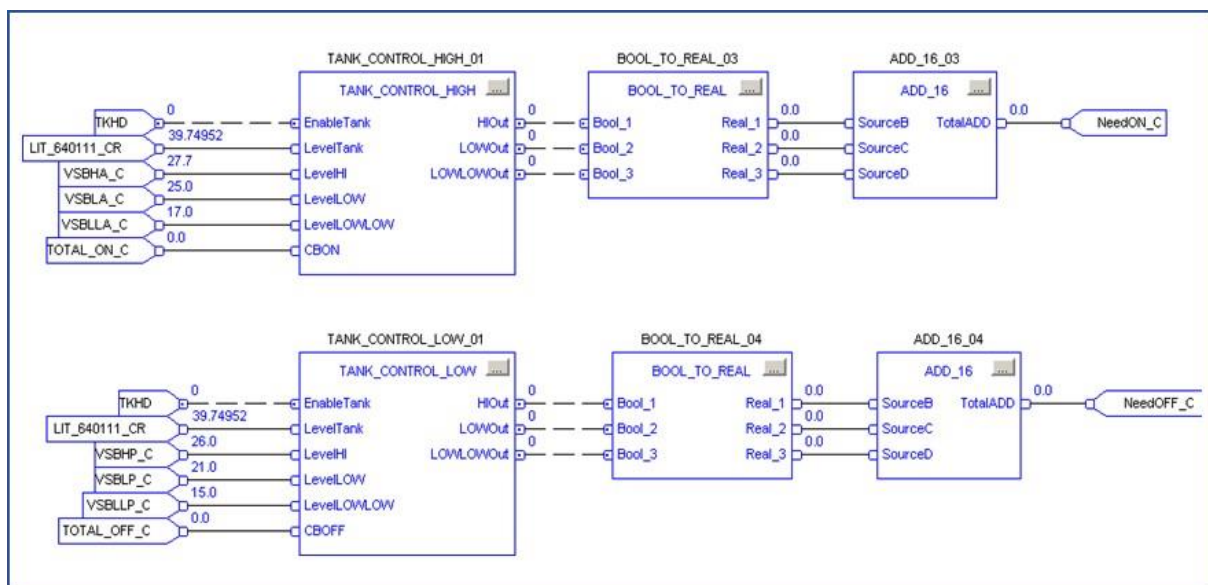


Figura 7. Nivel de arranque/parada crudo deshidratación

En la Figura 8, se ejecutan los comandos para arrancar o parar el bombeo del crudo o bien sea agua, una vez verificados los permisos o parámetros establecidos para arrancar o parar la bomba como lo son la existencia de los tanques, tiempos de operaciones o descanso y las protecciones de las mismas la secuencia o lógica de control procederá a encender o a apagar

la bomba. Cabe destacar que cada bomba tiene una hoja similar donde varían únicamente los tags propios de cada una de ellas, ya sean de la sala de bombas de crudo o la sala de bombas de aguas efluentes.

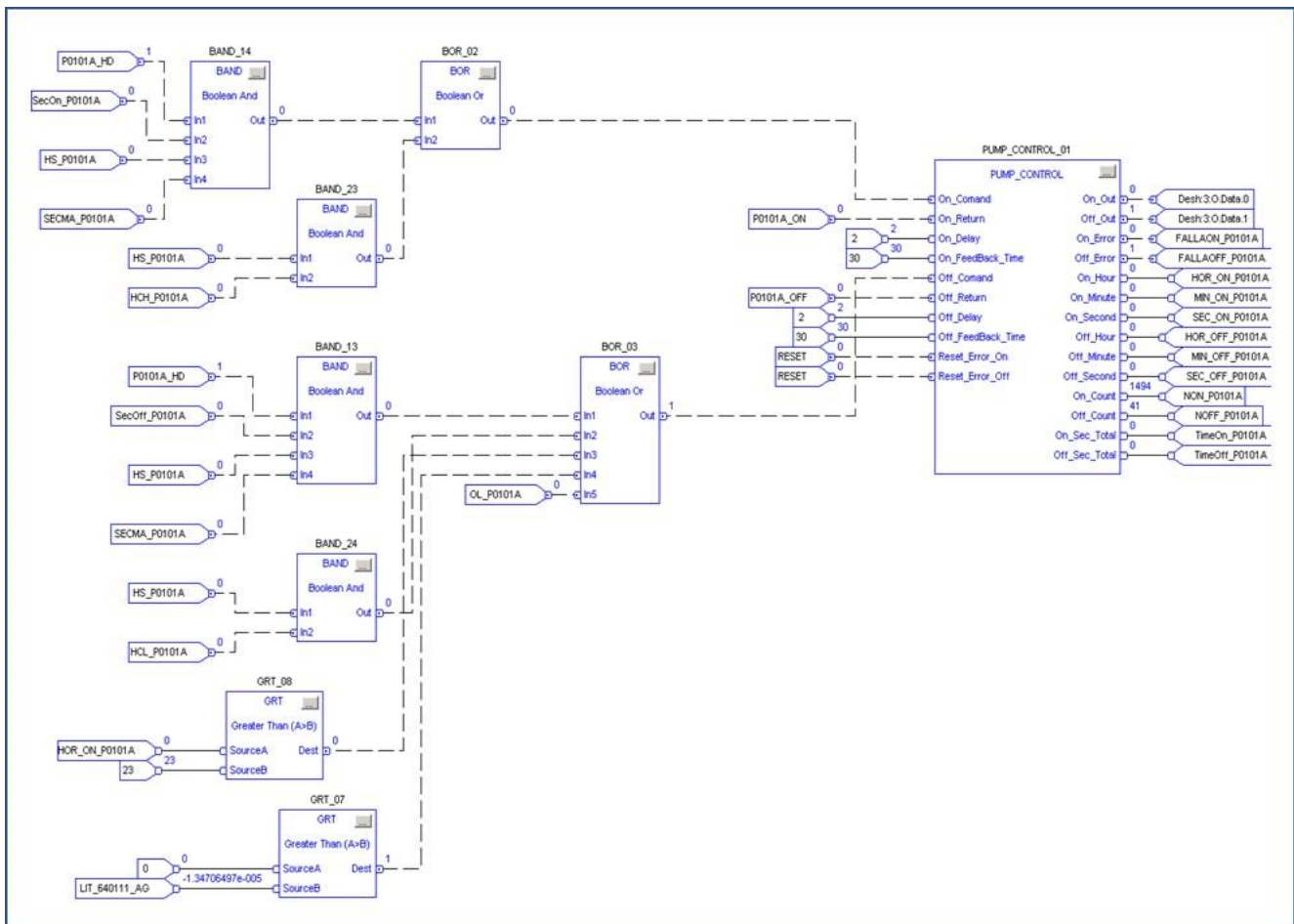


Figura 8. Selección de bombas agua a encender

Verificación e instalación o transferencia de la lógica de control al PLC ControlLogix. Una vez verificada y aceptada la lógica de control, se procedió a la transferencia de la misma al PLC ControlLogix instalado en los gabinetes de la Estación de Flujo Amana, para esto primeramente, se estableció la comunicación con el PLC mediante el modo ON-LINE, una vez establecida dicha comunicación se debe transferir la lógica o secuencia de control creada al PLC. Para ello, se le dio click en el icono de OFFLINE y seleccionamos la opción DOWNLOAD. El chequeo o verificación del programa se realiza durante la compilación, los posibles errores o avisos de la programación se muestran en una ventana de salida del mismo programa, haciendo click sobre el error, el cursor se posiciona en rojo sobre la instrucción o parte del programa que tiene error. En todo caso, la compilación se realiza automáticamente antes de hacer la transferencia de la lógica al PLC.

Elaboración de las Pruebas para posterior aceptación.

Después de descargada la secuencia de control al PLC, se procedió a realizar las pruebas para la aceptación de la propuesta, para esto el personal de PDVSA se dirigió a la Estación de Flujo Amana específicamente a la caseta o sala de control durante una semana para observar el comportamiento y funcionamiento de la lógica de control. Durante la observación, la secuencia funcionó correctamente y

posteriormente fue aceptada por el ingeniero de la Estación. La implantación de esta solución queda a potestad de PDVSA, debido a que un cambio de esta magnitud en sus procesos requiere un control de cambio operacional por afectación en la producción.

4. CONCLUSIONES

La investigación se fundamentó en aportar una herramienta tecnológica, que permite la visualización y control de las variables que intervienen en el Sistema de Deshidratación de Crudo Mediano de la Estación de Flujo del Complejo Operacional Amana, logrando de esta forma incrementar los niveles de confiabilidad y minimizar los accidentes inesperados y a su vez contribuir a mejorar la eficiencia de las operaciones en la industria petrolera venezolana.

El Sistema propuesto de Deshidratación de crudo mediano logra además el mejoramiento de la calidad del crudo evitando que el contenido de agua asociada al mismo disminuya su gravedad API y como consecuencia el descenso de su precio, y así prevenir la sobrecarga y reducción de la capacidad de conducción y transporte del oleoducto generado por la emulsión y los problemas de corrosión en los procesos de transporte y procesamiento, con ello garantizar la obtención de fluidos bajo especificaciones comerciales.

La selección de tecnologías se realizó mediante la evaluación de dichos sistemas, utilizando una matriz de evaluación con criterios previamente establecidos que permitió la selección del sistema ControlLogix para garantizar la supervisión y control de las variables que intervienen en el proceso del sistema de deshidratación de crudo mediano de la Estación de Flujo. Posteriormente, se seleccionó los distintos componentes y equipos que son compatibles al sistema de control seleccionado y a las exigencias del entorno.

El diseño propuesto de la arquitectura tecnológica del Sistema de Deshidratación, presenta una visión integrada del proceso que se lleva a cabo en dicho sistema. La propuesta del sistema de control se fundamentó en la elaboración de diagramas de procesos, arquitectura de control y realización de la lógica en el software RSLogix5000, y demás agregados, para llevar a cabo el desarrollo de la propuesta.

PDVSA y las compañías petroleras que cuentan con infraestructuras similares en sus estaciones de flujo pueden replicar el estudio teniendo en cuenta la naturaleza y la particularidad de su plataforma, lo que podría conducir al uso de la lógica de control propuesta y el posible cambio en los equipos y/o dispositivos utilizados en la presente investigación.

REFERENCIAS

- Acharya, V., Sharma, S., y Gupta, S. (2018). Analyzing the factors in industrial automation using analytic hierarchy process. *Computers & Electrical Engineering*, 71, 877-886. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.08.015>
- Ahmed, I., Obermeier, S., Sudhakaran, S. y Roussev, Vassil. (2017). Programmable Logic Controller Forensics. *IEEE Security and Privacy*, 15(6), 18-24. <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.4251102>
- Basant, T., Narendra, K., and Mini, S. (2023). Real Time Automation and Ratio Control Using PLC & SCADA in Industry 4.0. *Computer Systems Science and Engineering* 2023. 45(2), 1495-1516. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.030635>
- Basant, T., and Narendra, K. (2020). PLC and SCADA based Industrial Automated System. *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, Bangluru, India, 1-5, <https://doi.org/10.1109/INOCON50539.2020.9298190>
- Farfán, J. (2020). La implementación de un sistema automatizado reduce los tiempos de atención en los procesos aplicables a la ventanilla única de turismo en la Municipalidad Provincial del Callao. *Industrial Data*, 23(2), 31-37. <https://doi.org/10.15381/idata.v23i2.15566>
- Fletcher, S., Johnson, T., Adlon, T., Larreina, J., Casla, P., Parigot, L., Alfaro, P. and Otero, M. (2019), Adaptive Automation Assembly: Identifying System Requirements for Technical Efficiency and Worker Satisfaction. *Computers and Industrial Engineering*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.036>
- García, M., Irisarri, E., Pérez, F., Estévez, E., & Marcos, M. (2018). Automation Architecture Based on Cyber-Physical Systems for Flexible Manufacturing in the Oil and Gas Industry. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 15(2), 156-166. <https://doi.org/10.4995/riai.2017.8823>
- GGPIC. (1999). *Guías de Gerencias para Proyectos de Inversión de Capital*. PDVSA.
- Inzunza, B., Wright, C., Ghys, T. y Cools, P. (2020). Imaginarios de la robotización: la automatización desde la perspectiva del empleado. *Estudios Sociológicos De El Colegio De México*, 38(113), 567-600. <https://doi.org/10.24201/es.2020v38n113.1923>
- Jaibelieth, C. (2016). *Automatización del sistema de recolección de crudo de los pozos asociados a la estación de flujo EF_C-04. URBE*. [Tesis de maestría, Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín]. <http://virtual.urbe.edu/tesispub/0101779/intro.pdf>
- JianQin, J., LinLin, L., Tao, Q., HuiDong, H. (2022). Automated Production Line Control System based on Industrial Cloud Platform. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Manufacturing and Industrial Automation (CIMIA 2022)*. <https://doi.org/10.1117/12.2640996>
- Mendoza, L. (2016). Verificación Automática de Procesos Industriales Críticos con Autómatas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39(3), 121-129.
- Olaizola, I., Quartulli, M., Unzueta, E., Goicolea, J. y Flórez, J. (2022). Refinery 4.0, a Review of the Main Challenges of the Industry 4.0 Paradigm in Oil & Gas Downstream. *Sensors* 2022, 22(23), 1-15. <https://doi.org/10.3390/s22239164>
- Ricopia Technologies. (2018). La importancia de automatizar procesos en una empresa. <https://www.ricopia.com/la-importancia-automatizar-procesos-una-empresa/>
- Roncero, C., Medina, J., Vásquez, J., León, P., Fernández, J., and Urdy, E. (2023). Supervision and Control System of the Operational Variables of a Cluster in a High-Pressure Gas Injection Plant. *Processes* 2023, 11(3), 698. <https://doi.org/10.3390/pr11030698>
- Roncero Morales, C., & Pomblas, R. (2023). Modelo de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad Operacional para una Planta Compresora de Gas. *Revista Politécnica*, 51(1), 117-129. <https://doi.org/10.33333/tp.vol51n1.10>
- Roncero, C., & Pomblas, R. (2022). Sistema automatizado para el control del consumo de glicol regenerado suministrado al sistema de deshidratación del gas natural. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 34(4), 12-27. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n4.916>
- Roncero, C., Assi, J., Martinez, Y., Medina, J., León, P., & Fernandez, J. (2022). Sistema de Respuesta de Voz Interactiva (IVR) para la notificación de datos operacionales de la Planta Boquerón de la División Furril - PDVSA. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 34(3), 100-117. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n3.954>
- Saavedra, N. y Jiménez, F. (2014). Necesidades de Innovación y Tecnología para la industria de petróleo y gas en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (40), 50-56.

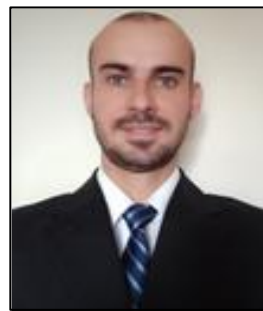
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932014000100008&lng=en&tlng=es.

- Silva, C., Asanza, V., Sánchez, N. y Arias, J. (2020). Implementation Of Automated System For The Reservoir 66 of the Irrigation System Chambo Guano, *Proceedings of the 2020 International Conference on Applied Electronics (AE)*, Pilsen, Czech Republic, 1-6, <https://doi.org/10.23919/AE49394.2020.9232888>
- Somavanshi, A., Austkar, S., and S. More, S. (2013). Automatic bottle filling using microcontroller volume correction *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)*, 2(3), 1-4. <https://doi.org/10.17577/IJERTV2IS3087>
- Zawawi, A. & El-Sayed, A. (2012). Integration of DCS and ESD through an OPC application for upstream oil and Gas. *Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6344817>
- UPEL (2006). *Manual de Trabajo de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*. FEDUPEL

BIOGRAFÍA



Cristhian Ronceros Morales, Doctor en Gerencia por la Universidad Yacambú, Magíster en Gerencia General por la Universidad de Oriente (UDO). Ingeniero de Sistemas por la UDO. Estudios avanzados en Gestión de Proyectos TIC y Certificaciones internacionales en Coaching organizacional y PNL. Experiencia de 19 años PDVSA, desempeñando cargos gerenciales en el área TI. Experiencia de 22 años como docente universitario en pregrado y posgrado. Docente investigador de la Universidad Privada San Juan Bautista (Perú). Docente investigador de la UDO (Venezuela). Autor de libro de metodología y publicaciones en las áreas de automatización, confiabilidad operacional, proyectos y gerencia. Scopus Author ID: 58094434900.



Ramón Pomblas, Magíster Scientiarum en Ciencias Administrativas mención en Gerencia General por la Universidad de Oriente (2018). Ingeniero de Sistemas por la Universidad de Oriente (2010). Estudios en el área de ingeniería de confiabilidad, ingeniería de gas, simulación de sistemas y sistemas de información. 10 años de experiencia en Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA), desempeñando cargos de ingeniería y de supervisión en el área de Desarrollo Tecnológico. Asesor en trabajos de investigación de la Universidad de Oriente (UDO) y la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (UNEFA).



José Luis Salazar, Ingeniero Electricista por Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño (1999). Experiencia de 19 años en la Industria Petrolera Venezolana (PDVSA), desempeñando cargos supervisores en Plantas de Gas y Estaciones de Flujo.

Elementos Reusables para Experimentar con Metodologías Basadas en Estrategias y Patrones de Privacidad

Caiza, Julio C.¹ ; López, Gabriel¹ ; Guamán, Danny S.¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, Quito, Ecuador

Resumen: En línea con el avance global, la región latinoamericana ha establecido legislaciones que buscan establecer orden en un contexto donde la explotación de los datos personales y la protección de la privacidad de las personas son de gran relevancia. Uno de los mecanismos establecidos para alcanzar tal orden es la *Protección de Datos desde el Diseño* de los sistemas. Para materializarlo, los investigadores en el dominio han enfocado muchos esfuerzos en los patrones de privacidad, en metodologías basadas en ellos y en las estrategias de diseño. Sin embargo, el estado del arte señala que hace falta evidencia empírica para validar su aplicación y utilidad. Asimismo, señala la complejidad para llevar a cabo experimentos que provean dicha evidencia. El objetivo de este trabajo es contribuir a la obtención de evidencia empírica y realizar un análisis de las metodologías que hacen uso de patrones de privacidad y de estrategias de diseño para definir un conjunto de elementos que puedan ser reusados al realizar experimentos. Para ello, hemos revisado la literatura, siguiendo un conjunto de pasos sistematizados y un proceso de bola de nieve, en busca de metodologías basadas en patrones y estrategias de diseño. A partir de los resultados se observa que las estrategias de diseño de Hoepman son las más aceptadas y que hay tres enfoques de metodologías que hacen uso de ellas. En estos enfoques, se identifican elementos que podrían ser reusables al plantear experimentos: estrategias, subestrategias, patrones de privacidad, PETs, relaciones y sistemas de patrones.

Palabras clave: privacidad, protección de datos, metodologías, diseño, estrategias, patrones.

Reusable elements for experimenting with methodologies based on strategies and privacy patterns

Abstract: In line with global trends, Latin America has established legislation to provide order in a context where personal data exploitation and the protection of people's privacy are relevant. *Data Protection by Design* is one of the mechanisms for achieving such an order. To materialize it, researchers in the domain have focused their efforts on privacy patterns, methodologies based on them, and design strategies. However, state of the art shows that there is a lack of empirical evidence about their application and utility. Likewise, it also highlights the complexity of carrying out experiments to provide such evidence. This study aims to contribute to providing such evidence and make an analysis of methodologies based on privacy patterns and design strategies to propose a set of reusable elements to be used in experiments. We have reviewed the literature, following systematized steps and implementing the snowballing technique to find methodologies based on privacy patterns and design strategies. The results show that the design strategies by Hoepman are the most accepted, and there are three approaches of methodologies making use of them. In these three approaches, we have identified elements that could be reused when planning experiments: strategies, sub-strategies, privacy patterns, PETs, relationships, and pattern systems.

Keywords: privacy, data protection, methodologies, design, strategies, patterns.

1. INTRODUCCIÓN

La *Privacidad* y la *Protección de Datos* han ido ganando protagonismo a medida que la región latinoamericana ha ido estableciendo legislaciones en esta materia. En el caso ecuatoriano, el 26 de mayo de 2021 se publicó la **Ley Orgánica de Protección de Datos Personales** (Asamblea

Nacional de la República del Ecuador, 2021). Esta ley busca establecer un orden para, por un lado, permitir la explotación adecuada de los datos, a la vez que busca salvaguardar los datos personales, y, por lo tanto, la privacidad de las personas.

Esta ley, fundamentada en el *Reglamento General de Protección de Datos Europeo* (European Parliament &

*julio.caiza@epn.edu.ec
Recibido: 10/05/2022
Aceptado: 22/02/2023
Publicado en línea: 01/05/2023
10.33333/rp.vol51n2.10
CC 4.0

Council of the European Union, 2016), establece la *Protección de datos desde el diseño* como uno de los mecanismos para cumplir con su objetivo. Este concepto está alineado con el de la *Privacidad desde el diseño* (Cavoukian, 2009), que busca proteger la privacidad de las personas desde las etapas tempranas del proceso de ingeniería de los sistemas.

La literatura muestra que la cantidad de contribuciones para realizar el proceso de ingeniería con consideraciones de privacidad ha ido en aumento (Gürses & Del Alamo, 2016); más aún aquellas dentro de la actividad de diseño de los sistemas respetuosos de la privacidad (Caiza et al., 2019; Lenhard et al., 2017; Morales-Trujillo et al., 2019). En estos estudios ha quedado de manifiesto que los patrones de privacidad son un área que ha captado mucha atención por parte de los investigadores. Por su naturaleza, los patrones, que son soluciones reusables a problemas que se repiten en contextos determinados por varias fuerzas, se ajustan a un contexto donde se requieren elementos que sistematicen la inclusión de cuestiones de privacidad en el proceso de desarrollo brindando un soporte adecuado a ingenieros no expertos en privacidad.

En el ámbito de investigación en patrones, los autores en Caiza et al. (2019) señalan la importancia que iban adquiriendo elementos como las estrategias (enfoques para materializar principios) y las metodologías, aunque de manera independiente. En ese mismo trabajo se señala la carencia de estudios empíricos que evalúen la aplicación de los patrones o sus beneficios, dejando a estos como asunciones extrapoladas de otros dominios como el de la orientación a objetos (Gamma et al., 1995), donde han tenido un notable éxito.

Específicamente, preguntas como ¿están los patrones de privacidad listos para ser usados?, ¿son fáciles de aplicar? y ¿proveen beneficios? habían quedado planteadas y su respuesta era necesaria de cara a avanzar en la investigación en patrones de privacidad y dar pruebas de su utilidad. En Caiza et al. (2021), se llevó a cabo un estudio empírico exploratorio, sin que aún se hayan obtenido resultados concluyentes. En este estudio, se señalan las limitaciones y oportunidades de experimentación en el área, haciendo énfasis en la dificultad y complejidad del proceso de experimentación.

En este contexto, en el presente artículo presentamos un conjunto de elementos que se pueden reusar al experimentar con metodologías que hacen uso de estrategias de diseño y patrones. Esto incluye aquellos elementos que forman parte de una metodología y aquellos que forman parte de la instrumentación para llevar a cabo un experimento.

Con este objetivo, se ha revisado el estado del arte siguiendo un proceso sistematizado guiado por los pasos dados en Petersen et al. (2015). Este proceso se ha organizado para contestar las siguientes preguntas de investigación:

RQ1. ¿Qué metodologías de diseño respetuosas con la privacidad que hacen uso de patrones y estrategias han sido reportadas en el estado del arte?

RQ2. ¿Qué elementos forman parte de las metodologías encontradas?

RQ3. ¿Qué instrumentos para experimentar con esas metodologías son requeridos?

2. TRABAJO RELACIONADO

Aunque se han llevado a cabo algunos estudios de literatura que buscan y estudian el desarrollo de los patrones de privacidad (Lenhard et al., 2017; Caiza et al., 2019 y Al-Slais, 2020), aún no se ha realizado un análisis de los patrones de privacidad trabajando conjuntamente con estrategias de diseño y dentro de métodos. Menos aún, con un objetivo hacia determinar elementos que ayuden a obtener evidencia experimental, que es aún carente en el dominio.

El trabajo reportado en Lenhard et al. (2017) estudia aquellos artículos primarios que proponen patrones de privacidad, y los categoriza, por ejemplo, según la etapa en el proceso de desarrollo en la que podrían servir. Asimismo, los categoriza según el nivel de madurez de las propuestas, y concluye que hace falta más trabajo empírico, sin realizar un análisis en profundidad respecto al ámbito de la experimentación o como lograrlo.

El estudio reportado en Caiza et al. (2019) toma un enfoque más amplio que el anterior y se orienta a determinar todos los posibles elementos, incluyendo los patrones de privacidad, que se usen en el proceso de diseño respetuoso con la privacidad. Dentro de sus resultados, resaltan que elementos como las estrategias, los patrones y los modelos de referencia son los más estudiados en el ámbito. Específicamente, identifican que los patrones de privacidad son los elementos más reportados y mencionan que solo la propuesta de más patrones no garantiza su implementación o adopción. Aunque señalan la falta de evidencia empírica y dejan planteadas preguntas referentes a la efectividad, a los beneficios y a su adopción; no señalan cómo avanzar hacia obtener evidencia.

Al-Slais (2020) adopta un enfoque más amplio y estudia la literatura para categorizar metodologías para la ingeniería de privacidad. Las categoriza por aquellas basadas en la evaluación de impacto a la privacidad, en aquellas basadas en modelos y aquellas orientadas a la ingeniería de requisitos de privacidad. Además, identifica a los patrones de privacidad como elementos usados dentro de ellas y llama por el desarrollo de más patrones para la amplia variedad de aplicaciones de software que pueden existir. Sin embargo, no se aborda la necesidad de la evidencia empírica de cara a probar su aplicación.

En este escenario, donde aún varios esfuerzos se van centrando en el desarrollo de nuevos patrones de privacidad, sigue pendiente el conseguir evidencia empírica respecto a su proceso y facilidad de aplicación, además de probar sus beneficios. Uno de los tipos de estudio más relevantes para tal fin es la experimentación. Precisamente, el presente trabajo analiza y aspira a brindar un conjunto de elementos reusables para llevar a cabo experimentos con metodologías que hacen uso de estrategias de diseño y patrones de privacidad.

3. MÉTODO

La estrategia utilizada para la búsqueda de información se basa en un proceso sistematizado que utiliza los pasos de estudios sistemáticos de literatura (Petersen et al., 2015) y en la búsqueda de referencias a través de una bola de nieve hacia atrás — *backward snowballing* (Wohlin 2014). La base de datos utilizada en el proceso fue Scopus, reconocida como la mayor base de datos de trabajo por pares (Elsevier, 2020) y que ofrece buenos resultados respecto a la búsqueda de estudios primarios en el dominio de la computación (Cavacini, 2015).

Tabla 1. Cadenas de búsqueda

Cadenas de búsqueda		Fecha
1	TITLE-ABS-KEY (("privacy" OR "data protection") AND ("engineering" OR "design") AND ("methodology" OR "method" OR "process" OR "procedure" OR "approach") AND ("strategy" AND "pattern"))	3/24/2021
2	TITLE-ABS-KEY (("privacy engineering" OR "privacy design" OR "privacy by design") AND ("methodology" OR "method" OR "process" OR "procedure" OR "approach") AND ("review" OR "mapping" OR "survey" OR "state of the art"))	3/24/2021

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión

Inclusión/exclusión automática	
Tipo de documento	Artículo de revista, artículo de conferencia, libro y capítulo de libro.
Idioma	Inglés.
Área	Informática e ingeniería.
Inclusión/exclusión manual	
Inclusión general	Área de privacidad y protección de datos.
Inclusión de estudios primarios	Reporta una metodología de diseño de privacidad basada en estrategias y patrones.
Inclusión de estudios secundarios	Reporta metodologías sobre el diseño de la privacidad.

Tabla 3. Procedimiento de inclusión y exclusión

Paso	Descripción
Primera Iteración: leer el título de cada artículo resultado de la <i>cadena 1</i> y marcarlo:	
1	- <i>Poco claro</i> => Si no hay un argumento claro para la exclusión. - <i>Inclusión</i> => Si cumple con todos los criterios de inclusión. - <i>Exclusión</i> => Si hay un criterio de inclusión que no se cumple.
2	Segunda iteración: leer el título y el resumen de los trabajos incluidos y no claros para finalmente incluirlos o excluirlos.
3a	Reunir un conjunto <i>cap1</i> de artículos primarios.
3b	Reunir un conjunto <i>cas1</i> de artículos secundarios.
4	Examinar el conjunto <i>cas1</i> de artículos secundarios y obtener artículos primarios de interés.
5	Leer el título y el resumen de los trabajos anteriores recogidos en el paso 4. Inclúyalos o exclúyalos.
6	Reunir un conjunto <i>cap2</i> de artículos primarios incluidos en el paso 5.
7	Reunir el conjunto final de artículos que unen <i>cap1</i> y <i>cap2</i> .

Una vez definido las preguntas de investigación, se procedió a estructurar dos cadenas de búsqueda (Tabla 1), una para identificación de estudios primarios y otra para estudios secundarios. Sobre los resultados obtenidos al ejecutar las cadenas (136 para la cadena 1 y 82 para la cadena 2), se aplicaron criterios de inclusión y exclusión considerando el objetivo del estudio (Tabla 2). Estos criterios se dividieron en

aquellos que podían ser aplicados de manera automática mediante las funcionalidades de Scopus y aquellos que se aplican de manera manual al leer la información de los artículos. Además, se definió el proceso que debían seguir los dos miembros del equipo de investigación asignados a esta etapa (Tabla 3).

Luego de un proceso de 2 iteraciones de inclusión y exclusión, se obtuvieron 7 artículos primarios relevantes para el contexto del estudio y 3 secundarios. Sobre los artículos secundarios, se aplicó la técnica de bola de nieve hacia atrás, se adicionaron 3

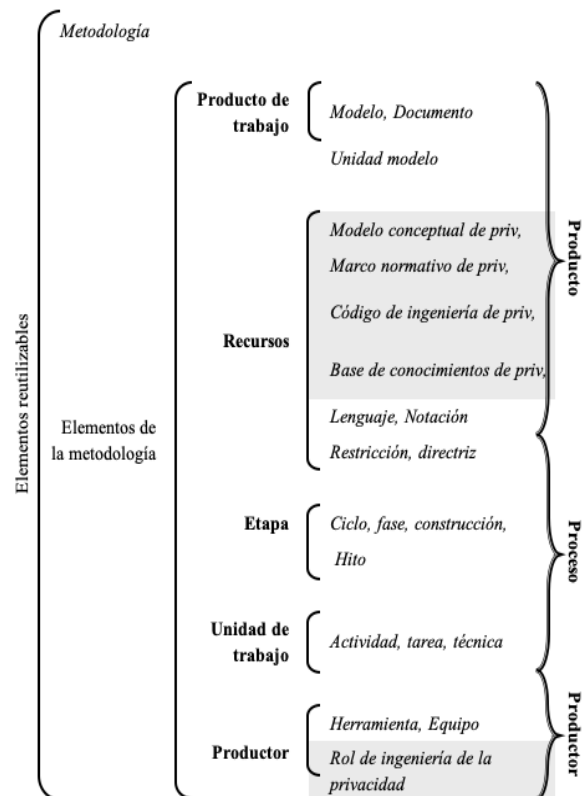


Figura 1. Elementos de metodologías según (International Organization for Standardization, 2014)

artículos primarios. De los 10 artículos primarios, se escogieron aquellos que utilizaban un enfoque común hacia las estrategias y patrones de privacidad, aquel propuesto en Hoepman (2014); se obtuvieron 8 artículos para la etapa de extracción y análisis. Vale la pena destacar que este enfoque, además de ser acogido por varios investigadores en el área de la ingeniería de privacidad, también ha sido considerado y adoptado por entidades europeas (Danezis et al., 2014), por la Agencia Española de Protección de Datos (Spanish Data Protection Authority, 2019) e incluso en el reciente estándar sobre Ingeniería de Privacidad para los Procesos del Ciclo de Vida de los Sistemas (International Organization for Standardization, 2019).

Para la etapa de extracción de información, se han utilizado diferentes categorizaciones obtenidas de normativas o de propuestas ampliamente aceptadas por los investigadores. Para extraer los elementos de las metodologías estudiadas. Hemos usado los tipos de elementos propuestos en el *Metamodelo de ingeniería de software para desarrollar metodologías de desarrollo definido en el estándar ISO/IEC 24744*

(International Organization for Standardization, 2014) (Figura 1). Asimismo, se ha procedido a refinar los elementos del tipo *Base de conocimiento de privacidad* mientras se los identificaba en el proceso de lectura.

Para establecer los tipos de elementos requeridos para preparar la instrumentación de un experimento, hemos tomado aquellos mencionados para el ámbito de la ingeniería de software (Wohlin et al., 2012) (Tabla 4). Debido a que estos elementos aparecen cuando las propuestas alcanzan un nivel de madurez de evidencia empírica, lo hemos determinado a través de la clasificación propuesta en Wieringa et al. (2006): *artículos de experiencia*, *artículos de opinión*, *artículos filosóficos*,

Tabla 4. Elementos de instrumentación en un experimento (Wohlin et al., 2012)

Página	Superior
Objetos de estudio	Se refieren a aquellos elementos que serán usados para evaluar lo que se está estudiando. Por ejemplo, los documentos con especificaciones de requerimientos o documentos código, o problemas a proponer.
Guías de experimentación	Son las instrucciones que guían a los participantes a través del experimento. Por ejemplo, las descripciones del proceso o procesos a seguir o un listado de tareas.
Instrumentos de medición	Aquellos elementos relacionados a la medición y recolección de los datos en un experimento. Por ejemplo, formularios manuales o entrevistas.
Herramientas de soporte	Son aquellas herramientas que van a servir como soporte en alguna de las etapas del proceso de experimentación.

Tabla 5. Artículos primarios analizados

Año	Cita	Título
2014	(Hoepman, 2014)	Privacy design strategies
2016	(Colesky et al., 2016)	A Critical Analysis of Privacy Design Strategies
2017	(Berendt & Preibusch, 2017)	Toward accountable discrimination-aware data mining: The importance of keeping the human in the loop and under the looking glass.
2018	(Colesky et al., 2018)	A system of privacy patterns for user control
2018	(Colesky & Caiza, 2019)	A system of privacy patterns for informing users: Creating a pattern system
2019	(Baldassarre et al., 2019)	Privacy Oriented Software Development
2020	(Baldassarre et al., 2020)	Integrating security and privacy in software development
2019	(Ahmadian et al., 2019)	Privacy-enhanced system design modeling based on privacy features

propuestas de solución, *investigación de validación* e *investigación de evaluación*. Las dos últimas categorías se asocian a estudios que muestran evidencia empírica a nivel controlado (e.g., en laboratorios) o a nivel de la práctica en un ambiente de producción, respectivamente.

4. RESULTADOS

La Tabla 5 muestra los 8 artículos que se basan en un enfoque común: aquel propuesto por Hoepman (Hoepman, 2014), los mismos que han sido finalmente analizados.

4.1 RQ1. ¿Qué metodologías de diseño respetuosas con la privacidad que hacen uso de patrones y estrategias han

sido reportadas en el estado del arte?

Considerando los artículos estudiados, se puede notar que el enfoque de Hoepman, inicialmente planteado en Hoepman (2014) se ha ido extendiendo en términos de elementos en el modelo (e.g., apareamiento de tácticas) (Colesky et al., 2016) o en términos a nuevas instancias de los elementos (e.g., nuevas estrategias) (Berendt & Preibusch, 2017).

Se puede notar tres procesos o métodos basados en las estrategias y patrones. El primero (Colesky et al., 2018; Colesky & Caiza, 2019) se alinea con la evolución de los conjuntos de patrones de diseño (Buschmann et al., 1996). Es decir, los conjuntos de patrones se agrupan en catálogos, luego llegan a ser sistemas, para finalmente, evolucionar a lenguajes de patrones. En este enfoque, se espera que a medida que los conjuntos de patrones evolucionen, estos lleguen a estar fuertemente interrelacionados, a definir guías claras de aplicación, e incluso a permitir construir sistemas, estructuras fundamentales o módulos completos en dominios muy específicos. En este enfoque, se tendría un contexto en el que se presentan requisitos de privacidad (planteados como objetivos o como amenazas (Notario et al., 2015)), sobre el cual habría que identificar las estrategias a aplicar y, dentro de estas, las tácticas. Al llegar al conjunto de patrones apropiado para esa táctica, se deberá identificar al menos un patrón que podría ser útil; luego, bajo las relaciones entre ellos, se podría identificar el conjunto de patrones más apropiado para el problema planteado.

En el planteamiento propuesto por Baldassarre et al., (2019, 2020) se contempla un método para todo el ciclo de desarrollo de software. Aquí, las estrategias de diseño y los patrones de privacidad se incluyen dentro de un producto de trabajo (de una etapa de evaluación) conocido como *reporte de privacidad* que es usado en la etapa de diseño. Esto se logra a través del análisis de un contexto, en el que se llega a determinar un conjunto de *vulnerabilidades OWASP* que se mapean con los *principios de PbD* (Privacy by Design – Privacidad desde el diseño) a los que afectan. Las *estrategias* son definidas a través de una tabla de mapeo a partir de los *principios de PbD* que ayudarían a alcanzar. A continuación, se definen los *patrones de privacidad*, a través de una tabla de mapeo entre las *estrategias* y los *patrones de privacidad*. El *reporte de privacidad* se usa como insumo de un proceso de diseño que toma la arquitectura objetivo y da lugar a una versión respetuosa con la privacidad. El proceso continúa hacia la codificación y luego hacia la verificación y validación.

Finalmente, en Ahmadian et al. (2019) se propone un método para modelar sistemas que mejoran la privacidad basado en elementos llamados *características de privacidad* (privacy features) que incluyen *estrategias* y *subestrategias* de diseño, los *patrones de privacidad* y las *PETS* (Privacy enhancing technology – tecnologías para el fortalecimiento de la privacidad). En este proceso, se determina un conjunto de *características de privacidad* que luego se integra en el modelo inicial de un sistema para producir una versión respetuosa con la privacidad. Antes de seleccionar las características de privacidad, se define, en función del contexto, un conjunto de *riesgos a la privacidad* y de *controles*

de privacidad según al NIST (National Institute of Standards and Technology - Instituto Nacional de Estándares y Tecnología). Los controles posteriormente son mapeados a las *estrategias* de diseño. Es fundamental resaltar en este enfoque la integración e interrelación jerárquica de las *estrategias de diseño*, las *sub-estrategias* de diseño, los *patrones* y las *PETS*.

Incluso, dentro del proceso de selección de las *características de privacidad* también se incluye una estimación de costos de las mismas. Esto se consigue a través de la representación de las *estrategias*, *subestrategias*, *patrones* y *PETS* usando diagramas de actividades. Eventualmente, todo este esquema serviría de guía para encontrar las soluciones más específicas a un problema y podría ayudar a automatizar dicho proceso.

Tabla 6. Elementos de diseño en las metodologías

(Hoepman, 2014) (Colesky et al., 2018; Colesky & Caiza, 2019)	(Baldassarre et al., 2019, 2020)	(Ahmadian et al., 2019)
Entrada: N/A	Entrada: Vulnerabilidades OWASP (Open Web Application Security Projec, 2022)	Entrada: - Riesgos para la privacidad. - Controles de privacidad del NIST (National Institute of Standards and Technology, 2020).
Recursos para diseño: - Principios de privacidad - Estrategias - Tácticas - Patrones de privacidad - Relaciones entre patrones - Sistemas de patrones - PETS	Recursos para diseño: - Principios de PbD - Estrategias - Patrones de privacidad - PETS - Tablas de asignación Producto del trabajo: - Informe sobre la privacidad	Recursos para el diseño: - Modelo de características - Modelo de costes - Configuración de características - Conjunto de RAM (modelos de aspecto reutilizables) - Perfil de mejora de la privacidad <i>El modelo de características contiene:</i> - Estrategias de diseño - Sub-estrategias de diseño - Patrones de diseño de privacidad - PETS - Relaciones entre esos elementos - Principios de privacidad (indirectos)
Resultado del diseño: Diseño del sistema (e.g., arquitectura)	Resultado del diseño: Arquitectura	Resultado del diseño: Modelo de sistema mejorado

* Se puede utilizar en el análisis y el diseño.

4.2 RQ2. ¿Qué elementos forman parte de las metodologías encontradas?

La Tabla 6 muestra el conjunto de elementos que se reportan dentro de las metodologías estudiadas, exclusivamente las que se orientan a la actividad de diseño de un sistema.

4.3 RQ3. ¿Qué instrumentos para experimentar con esas metodologías son requeridos?

Únicamente dos de los tres métodos han hecho esfuerzos por proveer evidencia empírica a través de casos de estudio: la propuesta en c y en Ahmadian et al. (2019). No obstante, se trata de estudios diferentes a un experimento, donde estos últimos se desarrollan en ambientes más controlados. En este sentido, únicamente considerando los artículos estudiados, no se puede responder directamente a la pregunta RQ3 debido a que no hay experimentos reportados.

Sin embargo, aprovechando el hecho de que un caso de estudio es un trabajo de gran valor a nivel empírico, hemos mapeado la información limitada que se ha reportado en los artículos a los elementos expresados en la Tabla 4, y lo describimos en los siguientes párrafos.

En la propuesta reportada en Baldassarre et al. (2019), el *objeto de estudio* es un sistema heredado que procesa datos personales y las *guías de experimentación* son aquellas establecidas en esta metodología. Como elementos relacionados a los instrumentos de medición se puede señalar como criterios de evaluación a las *vulnerabilidades* y al *número de vulnerabilidades* que ayudan en la toma de decisiones de diseño para implementar las soluciones. No se identifica algún elemento relacionado a *herramientas software de soporte*.

En la propuesta reportada en Ahmadian et al. (2019), el *objeto de estudio* incluye modelos de sistema UML (Unified Modeling Language – Lenguaje de Modelado Unificado) (incluyen diagramas de clase, componentes, actividades y de estado). Las *guías de experimentación* corresponderían a las señaladas dentro de la metodología propuesta. Respecto a los elementos relacionados a los *instrumentos de medición*, se puede considerar el criterio de *número de riesgos mitigados*. Al igual que el caso anterior, no se identifica algún elemento relacionado a *herramientas software de soporte*.

5. ELEMENTOS REUSABLES PARA EL PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN

Para determinar los elementos que podrían ser reusables en un proceso de experimentación con diferentes metodologías, hemos realizado un proceso de adaptación de aquellas estudiadas a las etapas genéricas de desarrollo: *desarrollo del concepto*, *análisis de requerimientos* y *diseño* (Figura 2, 3 y 4). Se ha denominado bancos al conjunto de elementos de un mismo tipo que se podrían re-utilizar. Un subgrupo de elementos de un banco es el que se usaría a lo largo de las acciones llevadas a cabo en el análisis y el diseño usando una metodología determinada.

Hemos encontrado posibles bancos de elementos reusables que son específicos y otros que son generalizables a los tres métodos analizados.

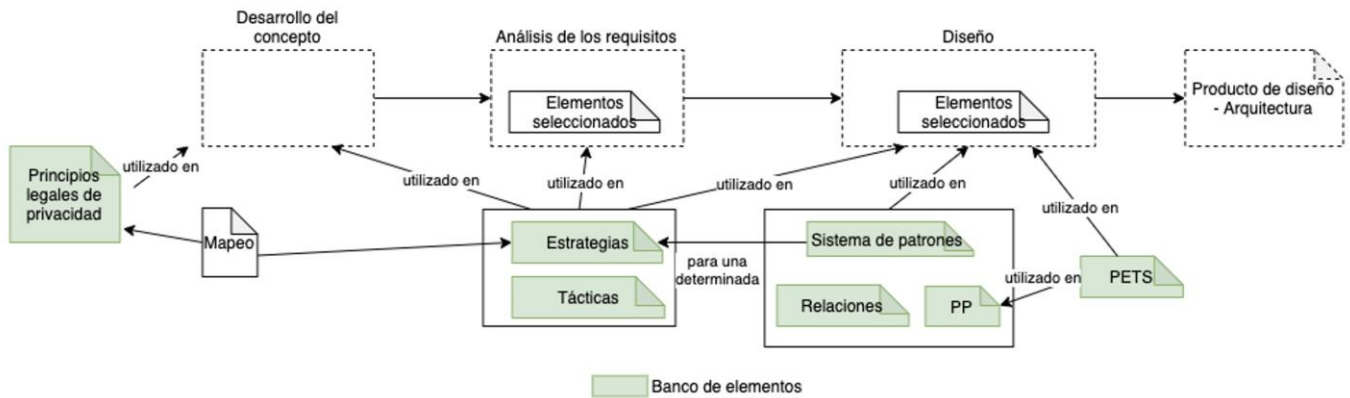


Figura 2. Interpretación de la propuesta de Colesky (Colesky et al., 2016) extendiendo a Hoepman (Hoepman, 2014)

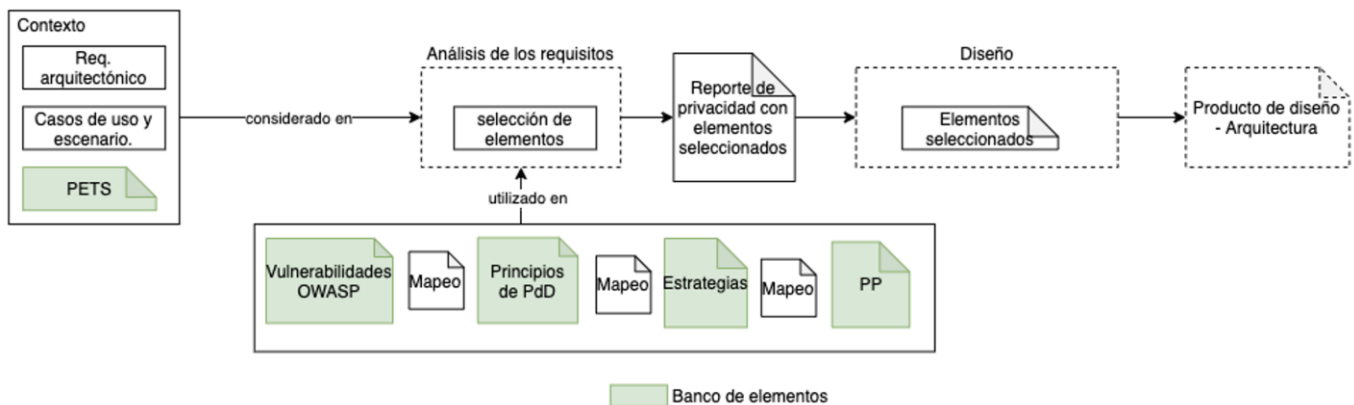


Figura 3. Interpretación de la propuesta de Baldassarre (Baldassarre et al., 2019, 2020)

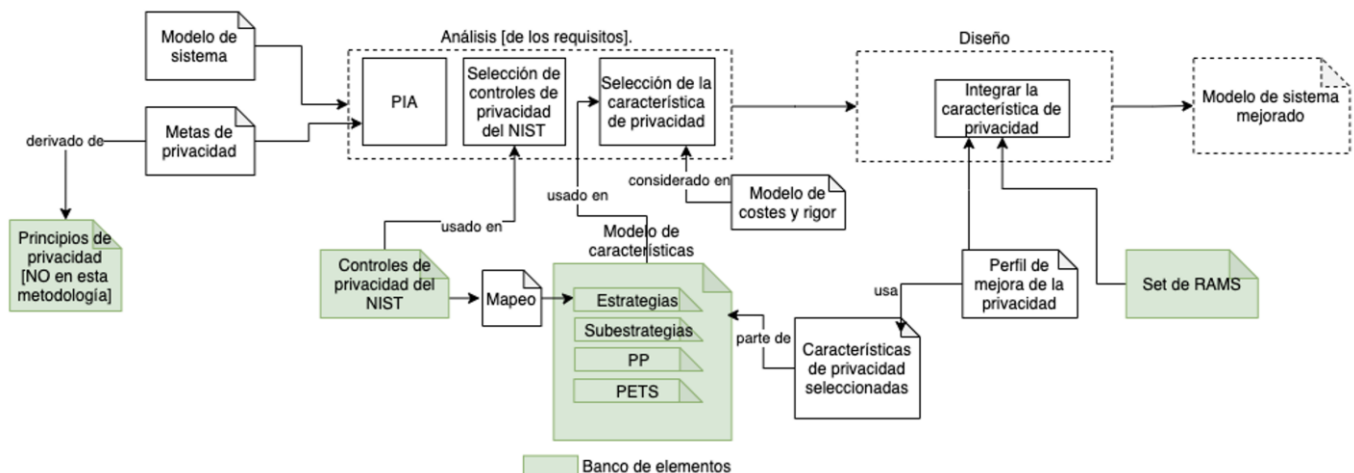


Figura 4. Interpretación de la propuesta de Ahmadian (Ahmadian et al., 2019)

- Aquellos elementos que son comunes a los tres métodos: *estrategias*, *patrones* y *PETs*. También se observa que se utilizan directa o indirectamente *principios* relacionados a la privacidad.
- Aquellos elementos comunes en al menos 2 métodos: *tácticas* o *sub-estrategias*.
- Otros elementos para el diseño: *sistemas de patrones*, *relaciones*, *controles de privacidad NIST* y *modelos de características de privacidad*. Otros para el análisis: *vulnerabilidades OWASP*.

El método reportado en Ahmadian et al. (2019) incluye elementos fuertemente enlazados dentro de sus *modelos de*

características de privacidad que podrían servir para la automatización del proceso de selección. Este fuerte enlazamiento hace que este tipo de modelos no sean generalizables. Al contrario, los *sistemas de patrones*, las *relaciones* y los *controles de privacidad NIST* sí podrían serlo. Hay que considerar que las relaciones y sistemas van en línea con la evolución de los patrones de privacidad, que tiene como una de sus características principales el ser reusables. Respecto a los *controles de privacidad NIST*, se trataría de elementos ya estandarizados, y ahí radica su relevancia. Finalmente, aunque las vulnerabilidades OWASP parecen estar más cerca del análisis, podrían ser un elemento relevante que considerar

debido a la fuerte proximidad natural que existe entre las etapas de análisis y de diseño.

Respecto a los elementos de instrumentación experimentales, estos no han sido encontrados directamente debido a que ninguno de los trabajos estudiados ha reportado un experimento. Sin embargo, luego de revisar los casos de estudio reportados, se considera que hay elementos que podrían ser útiles para ser reusados en un proceso de experimentación. Estos elementos incluyen los *modelos*, *lenguajes de modelado* y *diagramas* que se usen para representar sistemas existentes a ser extendidos para que soporten criterios de privacidad. Este tipo de elementos ya ha sido ampliamente estudiado y hay muchos bien conocidos y aceptados por la ingeniería; por ejemplo, los usados en el modelado UML. En el ámbito de los instrumentos de medición, sería interesante el analizar los *criterios y métricas de evaluación* aplicables a los casos de diseño con criterios de privacidad. Es decir, que permitan identificar si un diseño cumple con requisitos o consideraciones de privacidad.

6. DISCUSIÓN

Los resultados muestran el surgimiento de propuestas que integran los patrones de privacidad y las estrategias en métodos completos (Baldassarre et al., 2019, 2020) (Ahmadian et al., 2019) que buscan guiar a los ingenieros a lo largo del proceso de desarrollo. Aunque las contribuciones encontradas son escasas (10 artículos de acuerdo con el contexto de este estudio y 8 que mantienen un esquema común), se puede empezar a realizar algunas estimaciones, mientras se esperan más propuestas.

Por ejemplo, se puede notar que además del enfoque de proponer cada vez más patrones y de evolucionarlos hacia lenguajes (Colesky et al., 2016, 2018; Colesky & Caiza, 2019), aquellos más recientes (Baldassarre et al., 2019, 2020) (Ahmadian et al., 2019) los consideran dentro del proceso de desarrollo, en particular en las etapas de análisis y diseño. Esto indica la atención y esfuerzo que los autores prestan hacia su aplicación al crear sistemas. Inclusive la propuesta de Ahmadian et al., (2019) brinda un mayor detalle hacia cómo lograr la integración de cuestiones de privacidad a lo largo del proceso de modelado.

En este sentido, merece la pena notar dos aspectos. Por una parte, el enfoque de evolución de los patrones y el de su aplicación dentro de métodos pueden avanzar de manera simultánea; y no es necesario que los patrones terminen de evolucionar para comenzar a probar su aplicación. También, es importante recordar que los patrones, para alcanzar su nivel de sistema, deberían delinear su proceso de aplicación. Por otra parte, aunque se comience a hacer esfuerzo para materializar el proceso de aplicación de los patrones (paso muy relevante), aún es necesario determinar los efectos que provoca el uso de los mismos.

En tal sentido, llevar a cabo estudios empíricos donde se apliquen patrones de privacidad, dentro de un método o no, sigue siendo necesario. Los trabajos que reporten casos de estudio (Baldassarre et al., 2019) podrían responder

afirmativamente a la pregunta ¿están los patrones listos para ser usados?, pero en el contexto de los patrones usados en dichos estudios. Por ende, aún se requiere contestar a otras preguntas como ¿son fáciles de aplicar? y ¿proveen beneficios? Consideramos que los experimentos o cuasiexperimentos pueden ser muy relevantes para ello, ya que nos permitirán evaluar los efectos (ventajas o desventajas) al alterar diferentes variables o dependiendo de los tratamientos aplicados.

Finalmente, la complejidad inherente a llevar a cabo este tipo de estudios puede frenar a los autores de realizar este tipo de estudios; lo cual hace que el objetivo de nuestro estudio cobre aún más relevancia: proveer de un conjunto de elementos que puedan ser reusados al hacer experimentos. Consideramos que aportamos en esta vía al identificar aquellos elementos comunes a los enfoques actuales aquí encontrados: principios, estrategias, patrones, PETS, sub-estrategias. Inclusive la forma de llegar a los elementos más apropiados a través de tablas de mapeo o esquemas jerárquicos de categorizaciones.

7. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo una búsqueda en la literatura guiado por un conjunto de pasos sistematizados basados en la propuesta de Petersen et al. (2015) para encontrar aquellas metodologías que hacen uso de estrategias y patrones. De un conjunto de 136 artículos primarios y 82 secundarios, se han obtenido 10 artículos útiles para este estudio. La mayoría de ellos (8 de 10) se fundamentan en la propuesta de Hoepman (2014). Se pueden identificar tres enfoques derivados: el propuesto por Colesky et al. (2016, 2018) y Colesky & Caiza (2019), por Baldassarre et al. (2019, 2020), y por Ahmadian et al. (2019).

Luego de analizar estos enfoques, se han identificado elementos reusables que podrían ser usados para experimentar en esta área. Un primer grupo de elementos corresponden a las comunes a las metodologías estudiadas e incluyen *estrategias*, *patrones*, *PETs*, *tácticas* o *sub-estrategias*. Dentro de este mismo grupo se podrían considerar a elementos que aparecen de manera única pero que podrían ser útiles en la etapa de diseño: los *sistemas de patrones*, las *relaciones* (entre patrones o entre elementos de diferentes niveles de abstracción), los *controles de privacidad NIST* y las *vulnerabilidades OWASP*. Un segundo grupo de elementos corresponden a la instrumentación en los experimentos. El análisis menciona que elementos para el modelado como los lenguajes y diagramas serían útiles para expresar sistemas base que se van a extender con criterios de privacidad. Este tipo de elementos ha sido ampliamente estudiado en la literatura; por ejemplo, el lenguaje UML. Asimismo, se puede considerar las métricas o criterios que permitan determinar si un determinado diseño cumple con los requisitos de privacidad planteados.

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-DETRI-2021-03 “Soporte a la

experimentación en el diseño de sistemas respetuosos con la privacidad”.

REFERENCIAS

- Agencia Española de Protección de Datos. (2019). *A Guide to Privacy by Design*. https://www.aepd.es/es/documento/guia-privacidad-desde-diseno_en.pdf.
- Ahmadian, A. S., Strüber, D., & Jürjens, J. (2019). Privacy-enhanced system design modeling based on privacy features. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, Part F1477*, 1492–1499. <https://doi.org/10.1145/3297280.3297431>
- Al-Slais, Y. (2020). Privacy Engineering Methodologies: A survey. *2020 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing and Technologies (3ICT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/3ICT51146.2020.9311949>
- Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (2021, Mayo). *Ley orgánica de protección de datos personales*. Asamblea Nacional de la República del Ecuador. <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2021/06/Ley-Organica-de-Datos-Personales.pdf>
- Baldassarre, M. T., Barletta, V. S., Caivano, D., & Scalera, M. (2019). Privacy Oriented Software Development. *Communications in Computer and Information Science*, 1010, 18–32. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29238-6_2
- Baldassarre, M. T., Barletta, V. S., Caivano, D., & Scalera, M. (2020). Integrating security and privacy in software development. *Software Quality Journal*, 1–32. <https://doi.org/10.1007/s11219-020-09501-6>
- Berendt, B., & Preibusch, S. (2017). Toward accountable discrimination-aware data mining: The importance of keeping the human in the loop—and under the looking glass. *Big Data*, 5(2), 135–152. <https://doi.org/10.1089/big.2016.0055>
- Buschmann, F., Meunier, R., Rohnert, H., Sommerlad, P., & Stal, M. (1996). *Pattern-Oriented Software Architecture: A System of Patterns* (Vol. 1). John Wiley & sons.
- Caiza, J. C., Alamo, J. M. D., Guamán, D. S., & Jaramillo-Alcázar, Á. (2021). An exploratory experiment on privacy patterns: Limitations and possibilities. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing*, 1209–1216. <https://doi.org/10.1145/3412841.3441995>
- Caiza, J. C., Martin, Y.-S., Guaman, D. S., Del Alamo, J. M., & Yelmo, J. C. (2019). Reusable Elements for the Systematic Design of Privacy-Friendly Information Systems: A Mapping Study. *IEEE Access*, 7, 66512–66535. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2918003>
- Cavacini, A. (2015). What is the best database for computer science journal articles? *Scientometrics*, 102(3), 2059–2071. <https://doi.org/10.1007/s11192-014-1506-1>
- Cavoukian, A. (2009, Agosto). *Privacy by design: The 7 foundational principles*. Information and Privacy Commissioner of Ontario. <https://www.ipc.on.ca/wp-content/uploads/Resources/7foundationalprinciples.pdf>
- Colesky, M., & Caiza, J. C. (2019). A System of Privacy Patterns for Informing Users: Creating a Pattern System. *Proceedings of the 23rd European Conference on Pattern Languages of Programs - EuroPLoP '18*, 1–11. <https://doi.org/10.1145/3282308.3282325>
- Colesky, M., Caiza, J. C., Del Álamo, J., Hoepman, J.-H., & Martín, Y.-S. (2018). A system of privacy patterns for user control. *33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing*, 1150–1156. <https://doi.org/10.1145/3167132.3167257>
- Colesky, M., Hoepman, J.-H., & Hillen, C. (2016). A critical analysis of privacy design strategies. *2016 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW)*, 33–40. <https://doi.org/10.1109/SPW.2016.23>
- Danezis, G., Domingo-Ferrer, J., Hansen, M., Hoepman, J.-H., Metayer, D. Le, Tirtea, R., & Schiffner, S. (2014). *Privacy and Data Protection by Design - from policy to engineering*. European Union Agency for Cybersecurity. <https://doi.org/10.2824/38623>
- Elsevier Research Intelligence. (2020). *Scopus content coverage guide*. Elsevier. https://www.elsevier.com/data/assets/pdf_file/0007/69451/Scopus_ContentCoverage_Guide_WEB.pdf
- European Parliament, & Council of the European Union. (2016). *Regulation (EU) 2016/679 of the european parliament and of the council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Da*. <http://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. (1995). *Design Patterns : Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley.
- Gürses, S., & Del Alamo, J. M. (2016). Privacy engineering: shaping an emerging field of research and practice. *IEEE Security and Privacy*, 14(2), 40–46. <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.37>
- Hoepman, J.-H. (2014). Privacy design strategies. In N. Cuppens-Boulahia, F. Cuppens, S. Jajodia, A. Abou El Kalam, & T. Sans (Eds.), *ICT Systems Security and Privacy Protection. SEC 2014. IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 428, pp. 446–459). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55415-5_38
- International Organization for Standardization. (2014). *Software engineering – Metamodel for development methodologies* (ISO Standard No. 24744:2014). <https://www.iso.org/standard/62644.html>
- International Organization for Standardization. (2019). *Information technology — Security techniques — Privacy engineering for system life cycle processes* (ISO Standard No. 27550:2019). <https://www.iso.org/standard/72024.html>
- Lenhard, J., Fritsch, L., & Herold, S. (2017). A literature study on privacy patterns research. *Proceedings - 43rd Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications, SEAA 2017*, 194–201. <https://doi.org/10.1109/SEAA.2017.28>
- Morales-Trujillo, M. E., García-Mireles, G. A., Matla-Cruz, E. O., & Piatini, M. (2019). A Systematic Mapping Study of Privacy by Design in Software Engineering. *CLEI*

electronic journal, 22(1).
<https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/22819>

National Institute of Standards and Technology. (2020, Septiembre). *Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations*. <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-53/rev-5/final>.

Notario, N., Crespo, A., Martin, Y. S., Del Alamo, J. M., Metayer, D. Le, Antignac, T., Kung, A., Kroener, I., & Wright, D. (2015). PRIPARE: Integrating privacy best practices into a privacy engineering methodology. *2015 IEEE Security and Privacy Workshops*, 151–158. <https://doi.org/10.1109/SPW.2015.22>

Open Web Application Security Project. (2022). *OWASP Top Ten*. <https://owasp.org/www-project-top-ten/>.

Petersen, K., Vakkalanka, S., & Kuzniarz, L. (2015). Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. *Information and Software Technology*, 64, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.03.007>

Wieringa, R., Maiden, N., Mead, N., & Rolland, C. (2006). Requirements engineering paper classification and evaluation criteria: A proposal and a discussion. *Requirements Engineering*, 11(1), 102–107. <https://doi.org/10.1007/s00766-005-0021-6>

Wohlin, C., Runeson, P., Höst, M., Ohlsson, M. C., Regnell, B., & Wesslén, A. (2012). Experimentation in Software Engineering. In *Experimentation in Software Engineering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29044-2>

Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*. New York: ACM Press. 1–10. <http://dx.doi.org/10.1145/2601248.2601268>.

BIOGRAFÍA



el diseño de sistemas respetuosos con la privacidad y la realización de estudios de literatura siguiendo procesos ordenados y sistemáticos.

Julio C. Caiza, Ingeniero en Electrónica y Redes de Información por la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, y Doctor en Ingeniería de Sistemas Telemáticos por la Universidad Politécnica de Madrid, España. Actualmente es profesor titular agregado en la Escuela Politécnica Nacional. Sus principales temas de interés son



Actualmente se desempeña como docente investigador de la Escuela Politécnica Nacional en Quito.

Gabriel López, Ingeniero en Electrónica y Redes de la Información, por la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Máster en Seguridad de Sistemas por Sheffield Hallam University, Reino Unido, y Magister en Gestión de las Comunicaciones y Tecnologías de la Información, Escuela Politécnica Nacional.



investigación actual se centra en el análisis de la divulgación de datos y la evaluación del cumplimiento de requisitos de protección de datos en los sistemas de información.

Danny S. Guamán, Ingeniero en Electrónica y Redes por la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, y Doctor en Ingeniería de Sistemas Telemáticos por la Universidad Politécnica de Madrid, España. Actualmente, es profesor en la Escuela Politécnica Nacional. Su principal trabajo de

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

Academic
Resource
Index
ResearchBib

INDEX COPERNICUS
INTERNATIONAL

Crossref
doi
DIGITAL
OBJECT
IDENTIFIER



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 51, Nro. 1, Febrero - Abril 2023



revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec