

# revista politécnica



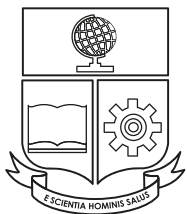
ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990

Volumen 46, No. 2 Noviembre 2020 – Enero 2021



revista  
**politécnica**



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990

Volumen 46, No. 2 Noviembre 2020 – Enero 2021

## TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral, editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados a las áreas de ciencias básicas (física, química y matemática) e ingenierías (agroindustria, ambiental, civil, eléctrica, electrónica, geología, mecánica, petróleos, sistemas y química). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

### EDITOR

Oscar Eduardo Camacho, Ph.D.  
*Escuela Politécnica Nacional*  
editor.rp@epn.edu.ec

### CO-EDITORA

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

### CONSEJO EDITORIAL

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

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

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

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

Ph.D. Silvia Calderón  
*Universidad de los Andes, Venezuela*

Ph.D. Jean François Dulhoste  
*Universidad de los Andes, Venezuela*  
Dr. Pamela Flores  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

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

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

Ph.D. Edinzo Iglesias  
*Universidad de los Andes, Venezuela*

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

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

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

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

Ph.D. José Luis Paz  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

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

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

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

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

Ph.D. Pablo Samaniego  
*Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Francia*

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

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

Ph.D. Carlos Smith  
*University of South Florida, Estados Unidos*

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

Ph.D. Cristian Vallejo  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Marcos Villacis  
*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

Ph.D. Cesar Witt  
*Université des Sciences et Technologies de Lille, Francia*

La Revista Politécnica está incluida en Scientific Electronic Library Online (SciELO), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB), Matriz de Información para el Análisis de Revistas (MIAR), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, PKP Index, Google Scholar, ResearchBib, International Institute of Organized Research (I2OR).

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

Ing. Katherine Aro  
katherine.aro@epn.edu.ec

#### **Proofreader**

MSc. María Eufemia Torres

#### **Diseño de Portada**

Ing. Cristian Basurto

## 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.

## Palabras del Editor

Este volumen cierra nuestra actividad del año 2020. Se presentan seis artículos asociados a diferentes áreas del conocimiento con temas de actualidad y de importancia para el país. Esperamos que los temas de este volumen logren interesar a investigadores, docentes y estudiantes en sus actividades propias. Un resumen de cada uno de estos artículos se muestra a continuación:

El primer artículo es presentado por Piedra y colaboradores. En este trabajo se muestra el estudio de la reducción de viscosidad de un crudo pesado, extraído del Oriente Ecuatoriano mediante el uso de compuestos dispersantes y disolventes de asfaltenos, para ser transportado dentro de un oleoducto. Para ello, se selecciona y clasifica a los reductores de viscosidad que tienen un efecto disolvente, dispersante o inhibidor de asfaltenos, por medio de sus espectros FT-IR resultantes. Se analiza el cambio de propiedades físicas y químicas del crudo con los reductores seleccionados por medio de cuatro pruebas. Finalmente, se realiza la evaluación de la facilidad del transporte de crudo en un banco de pruebas de tuberías que presenta comportamientos similares al transporte del crudo por un oleoducto.

El segundo artículo es presentado por Castillo, Coral y Salazar Méndez. En este documento se estudia la gran problemática de los accidentes de tránsito. En el Ecuador, los accidentes de tránsito constituyen un problema económico, social y de salud pública, siendo una de las principales causas de muerte. Durante los últimos años, la tasa de fallecidos por accidentes de tránsito ha ido en aumento, convirtiendo al Ecuador en uno de los países con mayor tasa de mortalidad de América Latina. En este artículo se analizan los accidentes de tránsito desde dos enfoques: i) pronóstico de accidentes de tránsito, ii) determinantes humanos y físicos de mayor incidencia en los siniestros de tránsito considerando los diferentes tipos de vehículos más utilizados en el Ecuador: motocicletas, vehículos livianos, comerciales, de pasajeros y pesados. Para esto se estimó un modelo ARIMA siguiendo la metodología de Box-Jenkins y un modelo logit multinomial, respectivamente. Los datos fueron proporcionados por la Policía Nacional y corresponden al periodo 2015 - 2018.

En el tercer artículo Paz y colaboradores proponen modificaciones de las ecuaciones de Bloch ópticas convencionales para un sistema molecular, cuando se consideran los efectos de acoplamiento intramolecular. Se modela la molécula aislada como curvas de energía de Born-Oppenheimer y se consideran dos estados vibracionales y una perturbación, que puede surgir de una correlación residual electrón-electrón y/o términos de acoplamiento spin-órbita en el Hamiltoniano del sistema. Las ecuaciones extendidas de Bloch ópticas permiten establecer la dinámica de un sistema molecular de estados adiabáticos sujeto a la interacción de un reservorio térmico e interactuando con campos electromagnéticos. En las ecuaciones se observa que haciendo nulo el factor de acoplamiento intramolecular, se recuperan las ecuaciones de Bloch ópticas convencionales para un sistema molecular con potenciales armónicos cuyos mínimos se encuentran exactamente en la misma coordenada nuclear sujeto a la aproximación Born-Oppenheimer

Andrade-Landeta, y Lascano-Lascano presentan el cuarto artículo. El objetivo fue estudiar el comportamiento de las paredes de dominio ferroeléctricas en una nanoesfera de titanato de plomo bajo diferentes condiciones térmicas, eléctricas y mecánicas. Para ello se ha hecho uso de la teoría fenomenológica de Ginzburg-Landau y para obtener el estado de equilibrio se utilizaron principios variacionales; las ecuaciones que aparecen en el desarrollo se resolvieron analíticamente. Los resultados obtenidos proveen un perfil de la polarización dentro de las paredes de dominio  $180^\circ$  de la nanoesfera de titanato de plomo, así como el espesor de dicha pared en

función de la temperatura y para distintas condiciones de la nanoesfera. Se observa que, con el aumento de la temperatura, el perfil de la polarización se reduce y el espesor de la pared crece al acercarse a cierta temperatura; lo cual permitiría sintonizar la temperatura de transición ferroeléctrica mediante el control del tamaño de la nanoestructura, de la presencia de cargas libres y de la aplicación de esfuerzos mecánicos.

En el quinto artículo Pilamunga-Shaca y Guevara-Rosero, utilizando un modelo de estimación de elección binaria de 2 etapas determinan los factores que motivan a las empresas a adoptar innovaciones previamente desarrolladas en productos y procesos. Se usó una muestra de 8 025 empresas ecuatorianas provenientes de la Encuesta de Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación, en sus ediciones 2009-2011 y 2012-2014. Los resultados concluyen que el recurso cognitivo de las empresas, las actitudes colaborativas con clientes y proveedores, y los canales de comunicación que estas tienen, influyen positivamente en la adopción de innovación. El tamaño de la empresa resultó tener una relación en forma de U, mientras que el nivel de exportaciones resultó no tener ningún efecto.

En el último artículo Bautista y Franco-Crespo presentan una investigación para evaluar una mezcla de empanizado con inclusión de almidón modificado de maíz para la aplicación en carnes de pollo, pescado y res. Tres tratamientos son formulados con variación de almidón modificado (10%, 20% y 30%). La metodología aplicada en este estudio considera un análisis sensorial, propiedades de color y textura, así como también la determinación del porcentaje de absorción de aceite. La mezcla con almidón modificado al 30% presenta los mejores resultados, dando como resultado menos pérdidas durante el proceso de fritura, mediante la evaluación de los atributos sensoriales del producto empanizado. La evaluación de las propiedades de color evidencia que la inclusión de almidón modificado no afecta grandemente en sus valores, generando así una coloración dorada en un rango de  $H^\circ$  de  $66,46 \pm 3,11$  a  $59,65 \pm 1,83$ ; mientras que, en la evaluación de las propiedades de textura, se produce una mejora en la dureza, cohesividad y masticabilidad. Finalmente, la cantidad de absorción de aceite en muestras con harina comercial (MC) presenta mayor absorción de aceite con un 14,83%, 17,72% y 22,54% para empanizados con carne de pollo, pescado y res respectivamente, mientras que el T3 con 30% de almidón modificado reduce la absorción de aceite con un valor de 11,01% para pollo, 15,32% en pescado y 16,16% en res empanizados.

Finalmente, a pesar de las dificultades, en este año nuestra revista ha logrado captar un mayor interés de lectores nacionales e internacionales. Se ha evidenciado un creciente número de visualizaciones, por lo que seguimos trabajando para que a través de sus publicaciones de acceso abierto, lleguemos a un mayor número de personas y países. Un agradecimiento a nuestros autores por la calidad de sus trabajos, a los revisores por su desinteresado apoyo e invaluable comentarios para mejorar los artículos y a todo el equipo de la Revista Politécnica por su mística de trabajo y sentido de pertenencia.

Oscar Eduardo Camacho Quintero, Ph.D.

**EDITOR**

**Contenido**  
**Vol. 46, No. 2**  
**Noviembre 2020 – Enero 2021**

7

Piedra Viviana; Salvador Marcelo; Guzmán Liliana; Santos Roque; Chango José-Iván

**Estudio de la Viscosidad en un Crudo Aditivado con Dispersantes y Disolventes  
Asfálticos**

*Viscosity Study in a Crude Oil Additive with Dispersants and Asphaltene Solvent*

21

Castillo Daniela; Coral Christopher; Salazar-Méndez Yasmín

**Modelización Econométrica de los Accidentes de Tránsito en el Ecuador**

*Econometric Modeling of Traffic Accidents in Ecuador*

29

Paz J. L.; Ruiz-Hinojosa E.; Alvarado Y.; Lascano L.; Fernández Lenys;  
Espinoza-Montero Patricio; Costa-Vera César

**Ecuaciones de Bloch Ópticas en Sistemas Complejos con Acoplamiento Intramolecular**

*On the Optical Bloch Equations in Complex Systems with Intramolecular Coupling*

39

Andrade-Landeta Julio; Lascano-Lascano Luis

**Comportamiento de las Paredes de Dominio Ferroeléctricas en una Nanoesfera de Titanato de Plomo**

*Behavior of Ferroelectrics Domain Walls in a Lead Titanate Nanosphere*

49

Pilamunga-Shaca Danny; Guevara-Rosero Grace

**Determinantes de la Adopción de Innovación en Ecuador**

*Determinants of the Adoption of Innovation in Ecuador*

63

Bautista Norma; Franco-Crespo Christian

**Evaluación de una Mezcla Empanizadora, con Inclusión de Almidón Modificado, para su Aplicación en Carnes**

*Evaluation of a Breading Mixture, Including Modified Starch, for Application to Meat*



# Estudio de la Viscosidad en un Crudo Aditivado con Dispersantes y Disolventes Asfálticos

Piedra, Viviana<sup>1</sup> ; Salvador, Marcelo<sup>2</sup> \* ; Guzmán, Liliana<sup>2</sup> ; Santos, Roque<sup>3</sup> ; Chango, José-Iván<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Departamento de Ingeniería Química, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

<sup>3</sup>Departamento de Ciencias Nucleares, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

<sup>4</sup>Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

**Resumen:** En Ecuador, el aumento de la cantidad de crudo pesado extraído genera preocupación en la industria. Debido a su naturaleza viscosa, presenta dificultades en el transporte y en la refinación. El objetivo de este proyecto es el estudio de la reducción de viscosidad de un crudo pesado, extraído del Oriente Ecuatoriano mediante el uso de compuestos dispersantes y disolventes de asfaltenos, para ser transportado dentro de un oleoducto. Para ello, se selecciona y clasifica a los reductores de viscosidad que tienen un efecto disolvente, dispersante o inhibidor de asfaltenos, por medio de sus espectros FT-IR resultantes. Se analiza el cambio de propiedades físicas y químicas del crudo con los reductores seleccionados por medio de cuatro pruebas: a) prueba para determinar la viscosidad; b) análisis S.A.R.A.; c) prueba de oliensis; d) prueba para determinar la gravedad API. Finalmente, se realiza la evaluación de la facilidad del transporte de crudo en un banco de pruebas de tuberías que presenta comportamientos similares al transporte del crudo por un oleoducto. Por medio de la clasificación y selección de los reductores, se escoge a los tres aditivos usados para las pruebas: M01-X, M02-A y M03-S. Se clasifica, a los dos primeros como disolventes de asfaltenos y el último como dispersante de asfaltenos. En la evaluación del cambio de propiedades del crudo el mejor resultado se obtiene con el aditivo "M01-X" con un porcentaje de reducción de viscosidad de 65,0 % y aumento del caudal del crudo de 1,24 a 2,01 (mL/s). Como alternativa y mejor resultado a este reductor se usó una mezcla formada por dos aditivos (M02-A + M03-S) con un porcentaje de reducción de viscosidad de 69,0 % y un aumento de caudal a 2,72 (mL/s).

**Palabras clave:** aditivo, asfaltenos, oleoducto, viscosidad.

## Viscosity Study in a Crude Oil Additive with Dispersants and Asphaltene Solvent

**Abstract:** In Ecuador, increasing quantities in the extraction of heavy crude oil has brought concern in the industry. Due to its viscous nature. This oil presents difficulties in transportation and refining. The objective of this project is the reduction of viscosity of this type of oil, that is extracted from the Ecuadorian Amazon and it is to be transported within a pipeline. The reduction in viscosity will be obtained from dispersing compounds and solvents in the oil example. To do this, viscosity reducers that had a solvent, dispersant or inhibitor effect on asphaltenes are selected and classified using their resulting FT-IR spectra. The change in physical and chemical properties of the crude oil is analyzed with the selected reducers. Four tests are carried out: a) test to determine the viscosity; b) analysis S.A.R.A.; c) oliensis test; d) test to determine API gravity. Finally, evaluation of crude oil transportation easiness is carried out in a pipeline bank that imitates crude oil transport through a pipeline. Through the classification and selection of the reducers. Three additives used for the tests are chosen: M01-X, M02-A and M03-S. The first two are classified as asphaltene solvents and the last one as an asphaltene dispersing. Regarding the evaluation of the change in crude oil properties. The best result is obtained with the additive "M01-X" with a viscosity reduction percentage of 65.0%, increase in the flow rate of the crude oil from 1.24 to 2.01 (mL / s). As an alternative to this reducer, a better result is obtained with the mixture formed by two additives (M02-A + M03-S) with a percentage reduction in viscosity of 69.0% and an increase in flow rate to 2.72 (mL / s).

**Keywords:** additive, asphaltenes, pipeline, viscosity.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las actividades relacionadas con la explotación del crudo pesado tienden a generar problemas económicos y

ambientales. Respecto a los problemas económicos, se puede nombrar al aumento de importaciones de crudo liviano utilizado para mezcla (con el crudo pesado extraído) así mejorar su calidad para refinación y algunas ocasiones su

\*marcelo.salvadorq@epn.edu.ec

Recibido: 08/08/2020

Aceptado: 22/09/2020

Publicado: 30/11/2020

10.33333/tp.vol46n2.01

CC BY 4.0

transporte. Esta importación en el 2018 ascendió a 32 millones de dólares. Este valor creció en referencia al gasto en 2017 y se prevé un aumento de importaciones de crudo liviano a futuro (EPPetroecuador, 2019a; EPPetroecuador, 2019b). Además, debido a la alta viscosidad que el crudo pesado presenta se generan dificultades operacionales en su transporte, entre ellas se encuentra el aumento en la presión de bombeo de los oleoductos, fallos y taponamiento de la tubería debido a la precipitación o deposición de asfaltenos y reducción en la eficiencia de las bombas (Akbarzadeh et al., 2007, pp. 24-40). Esto conllevará al incremento de gastos de mantenimiento por el fallo continuo o cambio de bombas.

Respecto a la problemática ambiental, se puede señalar a los derrames de petróleo como una de las causas más graves de contaminación. Los elementos naturales como el agua, suelo y aire que interactúan en diferentes ecosistemas son los más afectados debido a la contaminación que se produce por ello. (Plitt, 2010); (Cavazos, Pérez y Mauricio, 2014, pp.112-118). Los derrames de crudo tienen varios orígenes, por ejemplo, el 28 % es provocado por corrosión interna de la tubería, el 26 % por atentados como corte de tuberías para el robo de combustible, el 17 % por fallas mecánicas, el 1,5 % por desastres naturales y el 27,5 % por otras causas (En Ecuador hay un derrame petrolero por semana, 2013; Pacheco, 2019). Algunas de estas causas son consecuencias del transporte de crudo pesado, que genera daños y fallas en los sistemas de transporte y oleoductos (Iturbe, Flores, Castro y Torres, 2007, p.388; Becerra, 2019).

Para la resolución de las dificultades relacionadas con el transporte de crudo pesado existen varias alternativas, de las cuales la mayoría, tiene como objetivo principal la reducción de viscosidad. Algunos de estos métodos se encuentran en proceso de investigación y desarrollo como el flujo núcleo-anular o actualización de campo parcial (Abarasi, 2013; Bensakhria, Peysson y Antonini, 2004). Otros, utilizados son el calentamiento de tuberías, la mezcla con naftas o crudos livianos y la adición de aditivos reductores de viscosidad (Peralta, Blanco, Reina y Mantilla, 2017, p.8; Martínez et al, 2011; Langevid, Poteau, Henaut y Argillier, 2004)

El calentamiento consiste en proporcionar calor al oleoducto. La adición de crudo liviano al crudo pesado. Este proceso es generalmente realizado en refinería como una mejora de la calidad del crudo que será utilizado en la obtención de derivados del petróleo como gasolina y diésel. También se usa para facilitar el transporte del mismo (Peralta et al., 2017, pp.8-12). Estos procesos son usados a nivel mundial. En Ecuador por ejemplo OCP y Petroamazonas los utilizan para el transporte de petróleo.

A pesar de su uso frecuente, estas opciones presentan varias dificultades. El calentamiento, por ejemplo, debe contar con la disponibilidad de energía térmica e incrementa costos de operación, problemas internos de corrosión e inestabilidad en el flujo debido al cambio de las propiedades reológicas (Cortés, 2017, pp.35-52). Por otro lado, la dilución presenta inconvenientes por el aumento de importaciones de crudo liviano, ya que una mezcla efectiva necesitaría una proporción del 20 al 30 % de crudo liviano, con respecto a la cantidad de crudo pesado. Además, el aumento en el caudal por la adición de crudo liviano, daría como resultado un aumento en la

presión de bombeo. La mezcla de crudos provocaría inestabilidad en asfaltenos y parafinas lo que provocaría la precipitación de asfaltenos y posteriormente la obstrucción de las tuberías (Zahan, Bjorndalen e Islam, 2004, p.22).

Como último método está el uso de aditivos químicos especializados, diseñados para enfrentar dificultades específicas en los procesos relacionados con el petróleo crudo. Al hablar de aditivos nos referimos a los diferentes tipos de sustancias químicas que se agregan al crudo para mejorar sus propiedades físico químicas. Entre estas sustancias están los reductores de viscosidad, que trabajan para alterar las propiedades tixotrópicas del crudo para crear una viscosidad más baja y facilitan su transporte. Estos químicos pueden aplicarse en cualquier punto del proceso de extracción, transporte y producción de petróleo dependiendo de la necesidad e importancia del mismo. El xileno, hexano, tolueno, algunos tipos de alcoholes, grupos carboxílicos y resinas son algunos aditivos reductores de viscosidad que se conocen (Ancheyta, Trejo y Singh Rana, 2009; Halloran, 2015).

Los asfaltenos constituyen la fracción más pesada del crudo, forman agregados coloidales junto con las resinas. Poseen gran cantidad de anillos aromáticos unidos entre sí. Son una familia de compuestos que varía de petróleo en petróleo pero que poseen un comportamiento común, pueden originar precipitados y determinar las diferentes características del crudo como la viscosidad. Según el contenido de asfaltenos en el crudo, éste será más o menos viscoso (Subiaga y Cuattrocchio, 2006; Delgado, 2006).

Existen varios grupos de aditivos reductores de viscosidad, uno de esos grupos tiene efectos en la fracción de asfaltenos del crudo. Este grupo se clasifica en: inhibidores, disolventes y dispersantes de asfaltenos, cada uno con una acción diferente debido a la variación en sus composiciones químicas. Los inhibidores son moléculas con dos grupos funcionales: uno polar que es el que interacciona con los asfaltenos y otro no polar con un grupo orientado externamente para prevenir la floculación de los asfaltenos, son similares a las resinas naturales y algunos de ellos pueden actuar como dispersantes (Ancheyta et al., 2009).

Los dispersantes son moléculas anfifílicas, aditivos formados principalmente por surfactantes, que estabilizan a las moléculas de asfaltenos. Los disolventes a diferencia de los dos anteriores eliminan depósitos difíciles, modifican la cantidad de anillos aromáticos unidos entre sí y producen un efecto reductivo. Los más comunes son los aditivos formados por compuestos aromáticos como el xileno, el tolueno o los terpenos, los primeros son poco amigables con el ambiente mientras que los terpenos no son tóxicos (Ancheyta et al., 2009; Zamarripa, 2013)

Respecto a las dificultades que los aditivos presentan, está el grado de toxicidad que cada tipo de aditivo pueda tener, existen reductores muy tóxicos tanto para el ambiente como para el ser humano (Zamarripa, 2013). Además, los costos de aditivo varían según el tipo y la cantidad, en algunos casos son costos elevados que no compiten con los otros procedimientos (Allenson, Yen y Lang, 2011; Ghouloum et al, 2015).

En el país, el uso y la investigación de reductores de viscosidad especializados no es tan común, a diferencia de países como Estados Unidos, México, China, Arabia Saudita, Argelia y más; que han aumentado el número de investigaciones con respecto al uso de estos aditivos en la industria petrolera (NCYT Amazings, 2015; Halloran, 2015; Hamed, Kasem y Akbar, 2016; Sinopec Exploration & Production, 2012, Aisling Chem, 2018).

Algunos de estos químicos ya están en el mercado y son utilizados en los países mencionados anteriormente. Como ejemplo de reductores de viscosidad formulados existe el aditivo inhibidor dispersante de asfaltenos conformado por oxazolidinas derivadas de polialquilos (Mena et al., 2007), al nonilfenol-formaldehído modificado por poliaminas (Hamed, Kasem y Akbar, 2016), dispersantes con base de hexano, los comúnmente utilizados disolventes con base de xileno o escualeno marca Sigma-Aldrich con grandes resultados en los crudos extranjeros (Schlumberger, 2006).

En Ecuador existen empresas que desarrollan aditivos comerciales para el uso en la industria petrolera, algunos probados con éxito y otros aún están en desarrollo (Ekos, 2018). En cuanto a la investigación en el país, es necesario un mayor desarrollo donde se evalúe el efecto de este tipo de aditivos reductores de viscosidad disolventes, dispersantes e inhibidores de asfaltenos en el crudo ecuatoriano, tomando como pauta los resultados de los aditivos usados en crudos extranjeros, para el posterior uso y escala a la industria.

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio de la reducción de la viscosidad de un crudo pesado para el transporte a través de un oleoducto mediante el uso de compuestos dispersantes y disolventes de asfaltenos, con la finalidad de plantear soluciones a las problemáticas económicas y ambientales anteriormente mencionadas para disminuir las importaciones de aditivos y de crudo liviano utilizados para la reducción de la viscosidad.

## 2. METODOLOGÍA

Sustancias aditivas y reductoras de viscosidad son términos sinónimos. De igual manera, las sustancias reductoras de viscosidad que son inhibidoras, disolventes y dispersantes de asfaltenos son nombradas como términos semejantes con los aditivos o reductores de viscosidad en este documento.

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron cinco aditivos comerciales reductores de viscosidad. A partir de ellos, se seleccionó a los que tenían un efecto dispersante, disolvente e inhibidor en la fracción de asfaltenos. Luego se realizaron pruebas para analizar el cambio de propiedades del crudo con los aditivos seleccionados. Se comparó los resultados obtenidos con las características del crudo sin aditivo y se determinó el más eficiente. Finalmente, se realizó la prueba de facilidad de transporte y se determinó al reductor que provee una mejor facilidad de transporte al crudo por tuberías. Este estudio fue realizado a nivel experimental en laboratorio no en campo.

### 2.1. Selección de los reductores de viscosidad

Los cinco aditivos reductores de viscosidad seleccionados fueron analizados por medio de espectroscopia infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR), para su posterior clasificación y selección. Los análisis fueron realizados en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional.

La vibración de los enlaces que conforman los compuestos, son resultado de la absorbancia de energía, dando lugar a un espectro resultante. Cada grupo funcional da lugar a bandas características, que se asignan en la molécula a partes específicas provocando una frecuencia de grupo. Un grupo funcional absorbe radiación sin importar a que está unido, generando una banda y números de onda característica del espectro infrarrojo en un intervalo determinado de frecuencias. De esta manera se puede saber qué grupos funcionales están presentes en los aditivos (Atkins y de Paula, 2009, pp.345-348; Serrano, 2010).

Para el análisis se tomó una muestra del tamaño de una gota de cada reductor. El espectro resultante fue analizado por sus bandas, números de onda y frecuencias características. Este análisis permitió la identificación de los grupos funcionales que forman parte de la composición de cada reductor. (Barraza, de la Rosa, Martínez, Castillo, Cotte y Álvarez, 2013, pp. 370-374).

Con la identificación de los grupos funcionales se clasificó y se seleccionó a los reductores por su efecto disolvente, inhibidor o dispersante de asfaltenos. Los aditivos disolventes de asfaltenos pueden estar formados por grupos funcionales aromáticos, dioles o carboxílicos. Los dispersantes por grupos alquílicos de largas cadenas, sulfonatos o aminas. Los inhibidores por compuestos similares a las resinas naturales (Ancheyta et al., 2009; Zamarripa, 2013)

Los reductores seleccionados se utilizaron para las pruebas de cambio de propiedades físicas y químicas y facilidad de transporte.

### 2.2. Análisis del cambio de propiedades físicas y químicas del crudo con los diferentes tipos de reductor estudiados

Se realizó el análisis de cambio de propiedades físicas y químicas a las muestras de crudo con los tres aditivos seleccionados previamente. Para ello se efectuaron cuatro ensayos a) prueba para determinar la viscosidad b) análisis S.A.R.A., c) prueba de oliensis o mancha, d) prueba para determinar la gravedad API.

Adicionalmente como alternativa a los tres reductores seleccionados, se realizó una mezcla de dos aditivos con diferentes efectos en los asfaltenos, para evaluar la efectividad de los reductores de viscosidad del crudo por medio de la mezcla e individuales. Se tomó como variable la concentración (2 000 y 4 000 ppm) por triplicado, estos valores fueron seleccionados debido a ensayos previos realizados.

Para el análisis S.A.R.A., la prueba de oliensis o mancha y la prueba para determinar la gravedad API del petróleo se tomaron los mejores resultados en reducción de viscosidad de cada muestra de crudo con aditivo y de la mezcla de dos aditivos.

### 2.2.1. Prueba para determinar la viscosidad

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química. Su objetivo fue determinar la viscosidad de la muestra de crudo inicial y de las muestras de crudo con los reductores. Se utilizó un viscosímetro rotacional tipo Brookfield, bajo la norma ASTM D2196 “*Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer*” (ASTM, 2018).

Se tomó una muestra de crudo de 250 mL en un vaso de precipitación que se introdujo en un baño de agua a una temperatura de 45 °C (temperatura de trabajo normal en un oleducto) (Vivanco, 2011). Se esperó hasta que el crudo llegara a la temperatura de ensayo y ésta fuera constante. A continuación, se ajustó la velocidad de agitación, se desbloqueó la aguja del viscosímetro y se la introdujo dentro de la muestra de crudo. Se esperó hasta que la aguja se estabilizó. Se tomó los datos de viscosidad y porcentaje de torque (ASTM, 2018).

#### 2.2.1.1 Análisis estadístico

Para determinar la relación y eficacia de las pruebas para determinar la viscosidad de las muestras, se realizó el análisis estadístico ANOVA. El análisis tiene como fin determinar si existe o no una relación entre variables (factores) de un estudio, en este estudio las variables seleccionadas fueron la concentración y el aditivo. La relación, se determina por la variabilidad de los resultados entre cada tipo de reductor y las diferentes concentraciones. La viscosidad resultante de las muestras de crudo varía por los factores mencionados, si los valores de viscosidad fueran iguales no existiría una relación y el estudio no tendría valor (Saravia, 2015).

Para el análisis se calculó un valor de significancia (P) entre los factores, éste debió ser menor a 0,05, además se determinó un valor crítico y un valor calculado F (varianza); si el valor crítico fue menor al valor calculado se confirmaría una relación entre las variables. Estos valores son generales para el análisis y fueron tomados de bibliografía (Saravia, 2015).

Además, para conocer la interacción entre la viscosidad y los reductores se trabajó con un diseño experimental factorial 3×3 por triplicado, con un grado de confianza del 95% para observar la relación causa-efecto de los aditivos con la reducción de viscosidad. Fue aplicado a las muestras de crudo sin aditivo y con los 3 aditivos seleccionados previamente (ver la Sección 2.1) donde las variables controladas fueron concentración (1 000, 2 000 y 3 000 ppm) y aditivo reductor de viscosidad (Abarca, 2016; Cortés, 2017).

### 2.2.2. Análisis S.A.R.A. por adsorción cromatográfica

El análisis S.A.R.A. (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos), es un procedimiento utilizado para la

determinación de las fracciones del crudo. Estas fracciones están conformadas por los siguientes compuestos: resinas, aromáticos, asfaltenos y saturados. Estos ensayos se realizaron bajo la norma ASTM D2007 – 03 “*Standard Test Method for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils and Other Petroleum-Derived Oils by the Clay-Gel Absorption Chromatographic Method*” (ASTM, 2016a) y se los realizaron en los Laboratorios de Petroamazonas en Shushufindi.

Para el análisis de resultados se tomó los porcentajes de las fracciones de asfaltenos y resinas. Los porcentajes de cada fracción que se obtuvo de la muestra de crudo sin aditivo fueron el blanco. Estas se compararon con las fracciones de las muestras de crudo con los tres diferentes aditivos seleccionados y con la mezcla de dos aditivos.

### 2.2.3 Prueba de oliensis o mancha

Esta prueba fue realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. Se determinó la estabilidad de la fracción de asfaltenos que forma parte del crudo. Para la realización de la prueba se utilizó el método de prueba estándar siguiendo la norma ASTM D1370 “*Standard Test Method for Contact Compatibility Between Asphaltic Materials (Oliensis Test)*” (ASTM, 2016b).

Se tomó 1 mL de crudo y se mezcló con 1 mL de xileno. Se colocó una gota de esta mezcla en un papel filtro tipo Whatman de malla #1. Esta gota fue el blanco y se etiquetó como gota número 1. Luego se añadió 1 mL de n-heptano a la mezcla y se colocó una segunda gota en el papel filtro, etiquetada como gota número 2. Se repitió este procedimiento hasta que se completaron 11 gotas. Luego se secó el papel filtro en una estufa a 100 °C por 15 min (ASTM, 2016b). Después se dejó enfriar el papel y se examinó cada gota para identificar el anillo oleoso formado alrededor de la periferia de cada gota. Se tomó el número de la gota que contiene el anillo oleoso y se comparó con la Tabla 1 (Abarca, 2016).

### 2.2.4 Determinación de la gravedad API (Método del hidrómetro)

Este método de prueba fue realizado en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes (LACBAL) de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. Este procedimiento se utilizó para determinar la gravedad API y se realizó bajo la norma ASTM D287 “*Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method)*” (ASTM, 2012).

Se utilizó un hidrómetro dentro del rango API de 11-24 (escala). Se tomó una muestra de 200 mL de crudo en una probeta de 250 mL (ASTM, 2012). Luego se introdujo el hidrómetro dentro de la muestra. Se empujó dos divisiones de escala en el líquido y se soltó. Se dejó reposar el hidrómetro dentro de la muestra por un día (ASTM, 2012). Finalmente, se tomó la lectura del valor de gravedad API de la muestra; adicionalmente, se registró el promedio de los valores de temperatura antes y después de la lectura del hidrómetro (ASTM, 2012).

**Tabla 1.** Escala para la interpretación del grado de estabilidad de los asfaltenos. (Abarca, 2016)

Número de gota	Grado de estabilidad
1-3	Criticamente inestable
4-6	Inestable
7	Umbral
8-10	Estables

La gravedad API del crudo fue el blanco y se lo comparó con la gravedad API de las muestras de crudo con los tres diferentes aditivos seleccionados y con la mezcla de dos aditivos.

### 2.3. Evaluación de la Facilidad del Transporte de Crudo al Trabajar con Reductores de Viscosidad

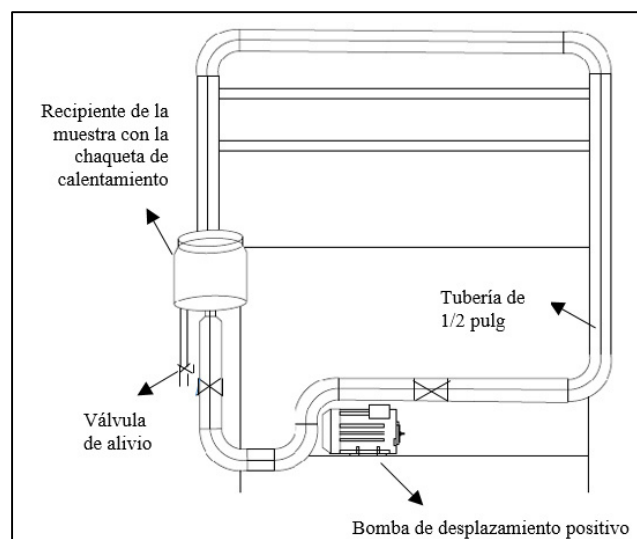
Se realizó la evaluación de la facilidad del transporte de crudo en un banco de pruebas de tuberías que puede imitar valores del transporte del crudo por un oleoducto. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. En las pruebas se evaluó el efecto de los reductores de viscosidad agregados en cada muestra de crudo, por medio del caudal y presión del sistema.

En la Figura 1 se observa el esquema del banco de pruebas; cuenta con un juego de tuberías Swalegok de ½ pulgada de diámetro, una bomba de doble diafragma y desplazamiento positivo de 3/8 de pulgada.

Para el almacenamiento de la muestra se cuenta con un recipiente metálico cilíndrico de 133,40 pulgadas de diámetro, con una capacidad de muestra de 1 500 mL, cubierto por una chaqueta de calentamiento acoplada con una termocupla para la medición de la temperatura de la muestra dentro del recipiente.

Las condiciones usadas en el banco de pruebas permiten que los resultados se escalen a nivel industrial. Condiciones como la temperatura que es la misma de trabajo que un oleoducto, la relación entre el caudal y el área transversal de la tubería que es igual a la velocidad del líquido transportado.

Se tomó una muestra de crudo de 1 000 mL, en el recipiente para almacenamiento de muestras del equipo. Posteriormente, se encendió el equipo y se trabajó con una temperatura de 45 °C (Vivanco, 2011; Moreira y Mena, 2018). Se abrieron las válvulas que dan paso a la muestra hacia el sistema de tuberías del equipo. Se esperó 2 horas para estabilizar el sistema.

**Figura 1.** Esquema del banco de pruebas (autoría propia)

Luego se tomaron datos de presión y de caudal de la muestra de crudo (datos que se toman en un oleoducto normal). Para obtener el caudal se tomó datos de volumen del crudo y tiempo de llenado de una probeta graduada (cuatro mediciones). Se repitió este procedimiento para las muestras de crudo con los tres reductores seleccionados y sus mezclas. La lectura de presión se realizó en el manómetro del equipo. Este valor determina la presión que ejerce el fluido dentro de la tubería del equipo para transportarse, al igual que en un oleoducto normal (Cortés, 2017; Abarca, 2016).

Se evaluó la eficacia de los reductores de viscosidad por medio del análisis de la variación de los datos de presión y caudal de la muestra de crudo (blanco) con las muestras modificadas con los distintos tipos de reductores (Cortés, 2017; Abarca, 2016).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Selección de los reductores de viscosidad utilizados

El análisis de espectroscopía infrarroja realizado a los reductores dió como resultado los espectros de cada uno con picos y números de onda característicos de los grupos funcionales que los forman. En el estudio de Chavéz, Zamuyo y Barba, (2013) determinaron que el reductor de viscosidad con el que trabajaron era un aditivo dispersante de viscosidad, ya que en su espectro observaron la presencia del grupo succimida con su enlace C=O resultado de su banda y número de onda característico. Este grupo se caracteriza por poseer compuestos surfactantes y perteneciente al grupo de dispersores de asfaltenos.

Los reductores seleccionados para las pruebas de cambio de propiedades fisicoquímicas y efectividad de transporte "M01-X", "M02-A" y "M03-S". De igual manera que en el estudio anterior, por medio de las bandas y números de onda característicos de los grupos funcionales que conforman cada aditivo se pudo determinar que los aditivos "M01-X" y "M02-A" son reductores disolventes de asfaltenos y el aditivo "M03-S" es un reductor dispersante de asfaltenos (Ancheyta, et al., 2009).

Los reductores de viscosidad “M04-A” y “M05-E” presentaron grupos funcionales como aldehídos, ésteres y sulfocianatos, estos grupos no presentan un efecto dispersante, disolvente o inhibidor de asfaltenos por esta razón no fueron seleccionados, ya que no son motivo de estudio. (Ancheyta et al., 2009; Chavéz et al., 2013).

En la Figura 2., se observa el espectro del aditivo “M01-X”, que presenta números de onda (720-680; 810-775; 3 005  $\text{cm}^{-1}$ ), siendo estos característicos del grupo funcional aromático; dentro del cual se encuentran compuestos como los isómeros de xileno. Por lo que se clasifica al reductor como un aditivo disolvente de asfaltenos. Al igual que al anterior reductor, el aditivo “M02-A” fue clasificado como disolvente de asfaltenos. En la Figura 3., se observa el espectro del aditivo “M02-A” con números de onda (3 040-2 845; 1 300- 1 250; 1 290-1 265; 1 120-1 100  $\text{cm}^{-1}$ ) característicos de las bandas de grupos funcionales dioles y carboxílicos (Ancheyta, et al., 2009; QUIORED, 2002).

El reductor “M03-S” fue clasificado como aditivo dispersante de asfaltenos. Como se observa en la Figura 4., este posee números de onda (2 897-2 723; 1 460-1 303; 840-604  $\text{cm}^{-1}$ ) característicos dentro bandas de grupos funcionales como sulfonatos, aminas y grupos alquílicos de largas cadenas. Además, el espectro analizado tiene similitudes con espectros de crudos de baja viscosidad lo que confirmaría la estabilidad que proporcionaría el aditivo y da como resultado la dispersión de los asfaltenos (Ancheyta et al, 2009; Remolina, Espitia, Luna y Patiño, 2019; QUIORED, 2002).

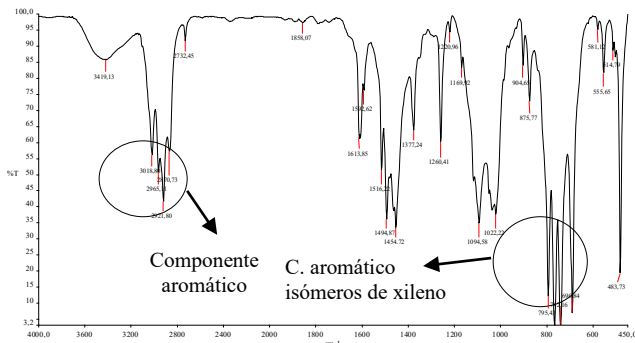


Figura 2. Espectro FT-IR correspondiente al aditivo “M01-X”

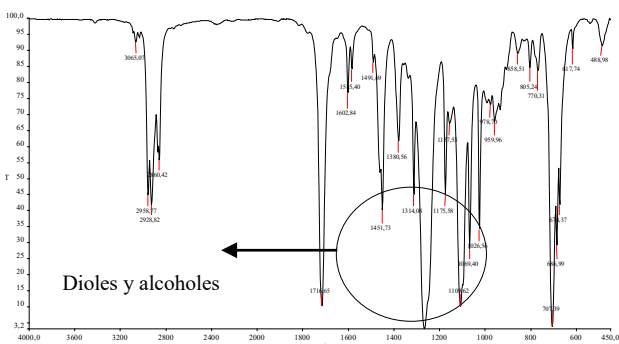


Figura 3. Espectro FT-IR correspondiente al aditivo “M02-A”

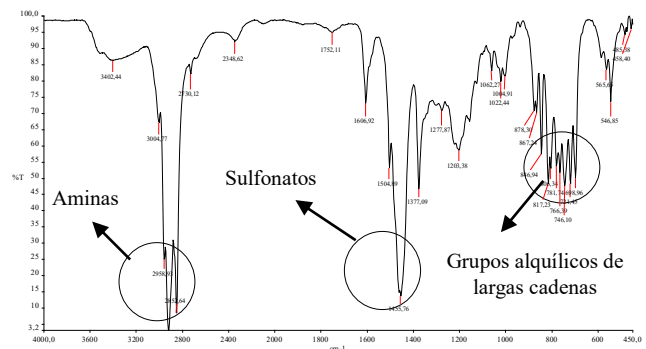


Figura 4. Espectro FT-IR correspondiente al aditivo “M03-S”

### 3.2. Análisis del cambio de propiedades físicas y químicas del crudo con los diferentes tipos de reductor estudiados

#### 3.2.1. Prueba para determinar la viscosidad

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las pruebas de viscosidad para la muestra de crudo inicial (blanco), las muestras de crudo con los tres reductores seleccionados y con diferentes concentraciones (1 000, 2 000 y 3 000 ppm). Se observa que el valor de la viscosidad de la muestra de crudo sin aditivo es de 2 590,0 cP, este valor se tomó como blanco para el análisis. En la Figura 5 se observa que el aditivo “M01-X” posee los porcentajes más altos de reducción de viscosidad en sus tres concentraciones utilizadas con 40,0; 51,0 y 65,0 % para 1 000, 2 000 y 3 000 ppm respectivamente, el aditivo “M02-A” posee los porcentajes más bajos de reducción de viscosidad con 26,0; 43,0 y 55,0 % a 1 000, 2 000 y 3 000 ppm respectivamente.

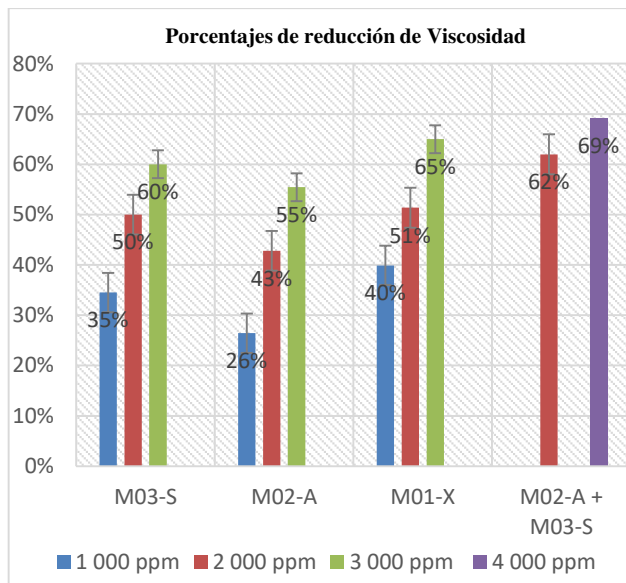
Los dos reductores “M01-X” y “M02-A” pertenecen a la misma clasificación de aditivos disolventes de asfaltenos pero su diferente composición y mecanismo de acción hace que la efectividad varíe entre ellos. El aditivo “M01-X” está formado por varios isómeros de xileno. Como se puede comprobar en el espectro. Éstos son los disolventes más efectivos debido a su característica aromática y anfífilica que da como resultado una disolución de asfaltenos más efectiva (Ancheyta et al., 2009) Sin embargo, es tóxico para el ser humano y en el ambiente. Por otro lado, el aditivo “M02-A” está formado por terpenos, principalmente por alcoholes y dioles. Al no poseer anillos aromáticos en su composición, da como resultado un menor porcentaje de reducción de viscosidad en el crudo, pero no son tóxicos (ATSDR, 2016; Remolina et al., 2019, pp. 40, 41).

El mecanismo de acción de los aditivos disolventes de asfaltenos “M01-X” y “M02-A” varía debido a la diferente composición de cada uno. Para el disolvente aromático (“M01-X”) su acción se da debido a la interrupción de los puentes de hidrógeno y las interacciones intermoleculares  $\pi$  en las moléculas de asfaltenos, reduciendo el grado de agregación de las moléculas disolviéndolas. Por otro lado, los disolventes alcohólicos disminuyen el tamaño de los agregados de los asfaltenos por la habilidad de establecer puentes de hidrógeno entre la molécula de disolvente y los asfaltenos disolviéndolos (Remolina et al, 2019, p. 42).

**Tabla 2.** Viscosidad de las muestras de crudo sin aditivo y de las muestras de crudo con cada reductor, con diferentes concentraciones y porcentaje de reducción de viscosidad a una temperatura de 45 °C

Viscosidad muestra de crudo (blanco) (cP)		2 590,0				
	M03-S		M02-A		M01-X	
C (ppm)	$\mu$ (cP)	% Re	$\mu$ (cP)	% Re	$\mu$ (cP)	% Re
1 000	1 696,0	35,0	1 906,0	26,0	1 557,0	40,0
2 000	1 221,0	53,0	1 482,0	43,0	1 259,0	51,0
3 000	1 025,0	60,0	1 154,0	55,0	918,0	65,0

(%Re: porcentaje de reducción de viscosidad;  $\mu$ : viscosidad; C: Concentración de los reductores)

**Figura 5.** Porcentajes de reducción de viscosidad de las muestras de crudo con cada uno de los aditivos seleccionados M01-X, M02-A y M03-S y la mezcla de dos de ellos (M02-A + M03-S)

Los tres mecanismos de acción tienen como objetivo atacar la agregación de asfaltenos ya sea por medio de la disminución de tamaño y disolución de moléculas o evitando la interacción entre ellas. Por ello la competencia de los mecanismos de acción de los tres aditivos se basa en los compuestos que conforman cada aditivo.

Los más efectivos en reducción de viscosidad son aquellos que poseen anillos aromáticos en su composición como el aditivo “M01-X”. El aditivo “M03-S” presenta compuestos alquílicos de cadenas largas y aminas. El primero con una buena efectividad, mientras que el segundo con la efectividad más baja de los grupos de compuesto dando como resultado un porcentaje de reducción intermedio para este aditivo. El aditivo “M02-A” presenta cadenas cortas de compuestos alquílicos (alcohólicos) con una buena efectividad, pero no superior al aditivo “M03-S” (Ancheyta, et al., 2009; Remolina et al, 2019, p. 41).

En comparación con los resultados de reducción de viscosidad en el estudio de Cortés (2017), donde presenta datos de dos aditivos comerciales “solvente orgánico” y “W20” añadidos a muestras de crudo pesado con API similar al utilizado en este estudio.

Los reductores utilizados (M01-X, M02-A y M03-S) obtuvieron mejores resultados en porcentajes de reducción de viscosidad con su concentración más alta. Mientras que los dos aditivos comerciales “solvente orgánico” y “W20” tuvieron rendimientos de 54,8% y 31,2 % respectivamente; los reductores utilizados en este estudio tuvieron porcentajes de 55,0; 60,0 y 65,0 %.

El aditivo W20 es un compuesto fluidificador y reductor de arrastre que separa el agua emulsionada en la masa del crudo. (OilFlux, 2014). Por otro lado, el “solvente orgánico” es un aditivo de aceite reductor de azufre que ayuda al aumento de la gravedad API. Por todas estas características estos aditivos son usados como reductores de viscosidad y poseen su propio efecto en el crudo. La diferencia de valores presentados anteriormente se da debido a que estos aditivos no tienen como objetivo algún efecto en los asfaltenos. Según bibliografía, los aditivos con un efecto en asfaltenos son los más eficaces con respecto a la reducción de viscosidad en el crudo (Ancheyta et al., 2009; Cortés, 2017).

Según Ancheyta et al., (2009), la combinación de dos tipos diferentes de aditivos da lugar a un efecto reductor de viscosidad más eficiente. En base a esta hipótesis, se realizaron pruebas de determinación de viscosidad de las muestras de crudo agregadas una mezcla, constituida por los reductores “M02-A” y “M03-S” elegidos al ser dos aditivos que presentan un efecto diferente en los asfaltenos y de los tres reductores seleccionados son los menos comunes. En la Tabla 3, se puede observar los resultados de las pruebas de viscosidad realizadas a las muestras de crudo con una mezcla de dos diferentes aditivos (M02-A + M03-S) en dos concentraciones diferentes 2 000 y 4 000 ppm.

En la Figura 5 se observa el porcentaje de reducción de la mezcla de aditivos (M02-A + M03-S) fue de 61,99 % Este valor es mayor a los resultantes de los tres aditivos solos; De igual manera, es mayor al porcentaje de reducción de viscosidad de los aditivos comerciales “solvente orgánico” y “W20” analizados en los estudios de Cortés (2017) anteriormente mencionados. La acción reductora de los aditivos se potencia al combinarse, debido a que los reductores atacan de diferente forma a la fracción de asfaltenos del crudo (Remolina et al, 2019, pp. 41, 42).

A partir de estos análisis se tomaron los mejores resultados en reducción de viscosidad de cada aditivo y de la mezcla de aditivos para los siguientes ensayos. Los mejores resultados en reducción de viscosidad se obtuvieron en aditivos con una concentración de 3 000 ppm y para la mezcla de dos aditivos (M02-A + M03-S) fue 4 000 ppm.

### 3.2.1.1. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico ANOVA se planteó dos hipótesis una nula y otra alternativa. La nula planteó que las medias de los valores de la viscosidad de las muestras de crudo no varían en relación a los diferentes tipos de aditivos y concentraciones. En cambio, la hipótesis alternativa estableció que al menos una media de los valores es diferente. En la Tabla 4, se presentan los resultados del ANOVA, realizado al tipo de aditivo y su concentración. Estos factores se analizaron al tomar en cuenta la viscosidad de las muestras del crudo resultantes.

**Tabla 3.** Viscosidad de las muestras de crudo con la mezcla de dos reductores (M02-A + M03-S) y el porcentaje de reducción.

Reductor	M02-A + M03-S	
Concentración (ppm)	$\mu$ (cP)	% Re
2 000	984,44	61,99
4 000	797,22	69,22

( $\mu$ : Viscosidad)

**Tabla 4.** ANOVA para la viscosidad-Suma de cuadrados tipo II

Análisis de varianza						
Factores	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Ver F
Concentración	714 370,13	2,00	357 185,07	117,44	0,0003	6,94
Tipo de aditivo	117 141,00	2,00	58 570,50	19,26	0,0089	6,94
Error	12 165,71	4,00	3 041,43			
Total	843 676,84	8,00				

(GL: grados de libertad; Razón F: varianza generada; Valor P: probabilidad (significación); Ver F: valor crítico de F)

Los valores de significancia (P) que presentaron las variables de concentración y tipo de aditivo, fueron de 0,0003 y 0,0089 respectivamente, y son menores de 0,05; además, se presentaron valores de F calculada de 117,44 y 19,6 y de F crítica de 6,94 para los dos factores. Estos resultados demuestran que efectivamente existe una relación entre los diferentes tipos de aditivos y concentraciones respecto a los valores de viscosidad de las muestras de crudo comprobando la hipótesis alternativa (Saravia, 2015).

### 3.2.2. Análisis S.A.R.A., gravedad API y grado de estabilidad de asfaltenos.

El análisis de asfaltenos y resinas de las pruebas S.A.R.A., como de gravedad API y de grado de estabilidad de asfaltenos de las muestras de crudo analizadas se realizó en conjunto debido a que estas propiedades tienen relación entre ellas. Además, estos análisis se realizaron como complemento de las pruebas de reducción de viscosidad, para el análisis de cambio de propiedades de crudo. En la Tabla 5 se presentan los resultados de los ensayos.

En algunas investigaciones se puede observar que el uso de este tipo de aditivos reductores de viscosidad de crudo que tienen un efecto inhibitor, disolvente o dispersante de asfaltenos, presentan cambios en las propiedades del crudo. Existe una relación entre la reducción de viscosidad, el aumento de la gravedad API, la disminución de la fracción de asfaltenos y la mejora en su estabilidad. Esto debido a que la disminución de la viscosidad radica en la estabilidad de la fracción de asfaltenos y en la formación de micelas (Rogel, Miao, Vein y Roye, 2015, p.156; Zhang y Huang, 2005, p. 1209).

Cuando las moléculas de asfaltenos se estabilizan la viscosidad del crudo disminuye, debido a que se evita las aglomeraciones de asfaltenos y se da la formación de micelas estabilizantes entre los asfaltenos y las resinas. Por otro lado, la gravedad API aumenta debido a su relación inversa con la densidad. La densidad del crudo disminuye por la separación de sus

moléculas y la debilitación de las fuerzas intermoleculares, provocando una expansión en el volumen, siendo este inversamente proporcional a la densidad (Wauquier, 2004).

**Tabla 5.** Resultados de los ensayos de las muestras de crudo con los 3 aditivos seleccionados y con la mezcla de dos reductores (M02-A + M03-S).

Muestra	C (ppm)	S.A.R.A.		°API (15,5 °C)	Grado de estabilidad	
		% Resinas	% Asfaltenos		# mancha	Grado
Crudo sin aditivo	S/A	47,59	13,11	16,0	7	Umbral
Crudo+ M02-A	3 000	53,49	10,73	17,0	9	Estable
Crudo+ M01-X	3 000	55,42	6,59	18,2	9	Estable
Crudo+ M03-S	3 000	53,05	11,86	17,7	8	Estable
Crudo+ (M02-A + M03-S)	4 000	61,88	9,27	18,5	8	Estable

(C: Concentración de los aditivos en la muestra)

La estabilidad del crudo está dada por la presencia de compuestos aromáticos, cadenas alquílicas laterales cortas, ramificaciones alifáticas, alcoholes, dioles, anillos aromáticos condensados y carbonos cuaternarios que los aditivos reductores de viscosidad le aportan. Por ejemplo, al incrementar la cantidad de compuestos con anillos aromáticos, aumenta la sustitución en cadenas ramificadas de alifáticos y genera una mayor estabilidad (Yu et al., 2014, p. 379).

Como se observa en la Tabla 5 y en la Tabla 2, la relación entre la reducción de viscosidad, el aumento de la gravedad API, la disminución de la fracción de asfaltenos y la mejora en su estabilidad es visible en los valores de las pruebas realizadas a las muestras. Por ejemplo, cuando a la muestra de crudo se le agregó el aditivo "M01-X" sus propiedades variaron, como se observó en la Sección 3.2.1, fue el aditivo más efectivo, con una mayor reducción de viscosidad en el crudo, la gravedad API aumentó de 16,0 a 18,2; el porcentaje de la fracción de asfaltenos se redujo de 13,11 % a 6,59 % y su estabilidad paso del umbral a estable.

Los resultados de las pruebas realizadas al "solvente orgánico" en los estudios de Cortés (2017, pp. 78 y 79) se observa que entre más alto era el porcentaje de reducción de viscosidad, mayor el aumento de la gravedad API. Se presentó una reducción de viscosidad de 54,84 % con un aumento de API de 14,7 a 15,7. Resultados que al compararlos con los obtenidos con los tres aditivos utilizados (M01-X, M02-A y M03-S) son menores a los de este estudio.

Hay que tomar en cuenta que el crudo es un fluido no newtoniano. Este presenta flujos turbulentos, el aditivo en el crudo hace que tienda a comportarse más como un fluido newtoniano. Se debe tomar en cuenta a la velocidad de corte del fluido ya que permite la relación de estas características con la viscosidad (García et al., 2010; Serway, Foughn, 2001).

El porcentaje de fracción de resinas en la muestra también es un factor determinante al evaluar la reducción de viscosidad asociada a la cantidad de asfaltenos. Las resinas alteran la capacidad de agregación e interacción de los asfaltenos, lo que



provoca su inhibición. Al aumentar la cantidad de resinas, mayor será la reducción de viscosidad (Zamarripa, 2013).

La muestra de crudo con una mayor cantidad de resinas fue la que contenía el aditivo "M02-A". Al no ser un fuerte disolvente de asfaltenos, como el reductor "M01-X", complementa su efecto reductor de viscosidad con un aumento en el porcentaje de la fracción de resinas en la composición del crudo. Como resultado, se tiene que la diferencia del porcentaje de reducción de viscosidad entre los aditivos "M01-X" y "M02-A" es alrededor de 10 y demuestra que los dos aditivos son reductores de viscosidad igualmente eficientes.

Respecto a los resultados de las muestras de crudo con la mezcla de dos aditivos (M02-A + M03-S) al igual que en las pruebas de viscosidad, la mezcla presenta los mejores resultados en comparación con los aditivos analizados. El porcentaje de la fracción de asfaltenos fue de 9,27 % y de resinas de 61,88 % debido a que la mezcla posee una acción combinada de disolución y dispersión de asfaltenos que se complementan con el aumento del porcentaje de la fracción de resinas. Esto resulta en un incremento de gravedad API de 16,0 a 18,2 y con un grado estable de asfaltenos.

### 3.3. Evaluación Técnica de la Facilidad del Transporte de Crudo al Trabajar con Reductores de Viscosidad

En el transporte de crudo por un oleoducto se presentan varios parámetros para evaluar la efectividad de transporte, entre ellos la presión del sistema, la temperatura, el caudal del crudo, etc. Este último es uno de los más importantes (Oñate y Rodríguez, 2012). Por ello se analizó el caudal de las muestras de crudo sin aditivo, con los tres diferentes reductores de viscosidad (M01-X, M02-A y M03-S) y con su mezcla (M02-A+M03-S) en un banco de pruebas que presenta comportamientos similares al transporte de crudo por un oleoducto.

En la Tabla 6 se observan los resultados obtenidos en el banco de pruebas del caudal de las muestras de crudo con y sin aditivo y de la presión del sistema. Las muestras de crudo con caudales más altos y con presiones del sistema más bajas son las muestras a las que se les agregó el aditivo "M01-X" y la mezcla de los aditivos (M02-A+M03-S), con un caudal de crudo sin aditivo de 1,24 mL/s y presión de 60 psi, a un caudal de 2,03 y 2,72 mL/s y presión del sistema de 42 y 40 psi respectivamente.

En comparación con la investigación de Zambrano (2015), donde se observa un perfil de crudos pesados con diferentes gravedades API y sus caudales en un oleoducto. Un crudo con un API de 13,5 tiene un caudal de 5 680 bopd y un crudo de 14,5 API un caudal de 25 363 bopd. Al igual que los valores resultantes de este estudio presentan una disminución de la gravedad API y un aumento del caudal.

El aumento de caudal depende de la facilidad que tiene el crudo para transportarse. Facilidad que está dada tanto por la viscosidad como por la gravedad API. Estos valores pueden cambiar dependiendo de la química del crudo (Oñate y Rodríguez, 2012).

**Tabla 6.** Caudal y presión del sistema para las muestras de crudo sin aditivo, con los 3 aditivos seleccionados y con la mezcla de dos reductores (M02-A +M03-S) y, para la evaluación de la facilidad de transporte.

Muestra	Concentración (ppm)	Caudal promedio (mL/s)	Presión del sistema (psi)
Crudo sin aditivo	S/A	1,24	60
Crudo+ M02-A	3 000	1,60	50
Crudo+ M01-X	3 000	2,03	42
Crudo+ M03-S	3 000	1,80	46
Crudo+ (M02-A + M03-S)	4 000	2,72	40

Estos resultados se dan por medio de diferentes factores, el efecto que provocan los aditivos al reducir la viscosidad en el crudo es asegurar un flujo de transición y retrasar la aparición de remolinos turbulentos (Johnston, Lauzon y Pierce, 2008, pp. 89-92).

El crudo, al ser un fluido no newtoniano, no se rige por la ley de Poiseuille, la cual relaciona indirectamente el caudal con la viscosidad del fluido, debido a que se acopla a fluidos ideales con flujo laminar, pero esta relación permite entender el efecto que provoca el aditivo en el crudo. Al agregar un reductor de viscosidad al crudo se logra estabilizarlo y que no presente un flujo turbulento al transportarse por la tubería; es decir, se asemeja a un flujo laminar donde existe una menor fricción con las paredes del oleoducto. También el aditivo hace que el petróleo tienda a comportarse más como un fluido newtoniano, lo que genera una mayor facilidad de transporte y da como resultado final un aumento en el caudal por la reducción de viscosidad (García et al., 2010; Serway, Foughn, 2001; Alfonso, Hernández, Mediaceja, 2017).

La presión del sistema en el banco de pruebas es la presión que ejerce la bomba para transportar la muestra por la tubería. Se relaciona con la viscosidad debido a que ésta es la resistencia a fluir, y entre más alta sea la viscosidad de la muestra, mayor es la resistencia a fluir y, por ende, la presión necesaria para bombear el flujo es más alta debido al impedimento de estas fuerzas para fluir. Además, los fluidos viscosos presentan pérdidas de energía en forma de calor debido a la fuerza que ejerce el fluido al pasar por las paredes de la tubería y, por tanto, la velocidad de salida de la tubería y caudal son más bajos (Streeter, 2003; Rosero, 2012; Martín, Salcedo y Font, 2011).

Los resultados obtenidos en este estudio pueden escalarse a nivel industrial ya que la relación entre el caudal del crudo y el área de la tubería tiende a ser la misma y la presión de bombeo es dada por la facilidad de transporte (viscosidad). Además, este estudio puede servir como base para la formulación de aditivos reductores de viscosidad.

#### 4. CONCLUSIONES

Por medio de la selección física y química de los reductores de viscosidad se determinó los tres aditivos seleccionados para ser utilizados: “M01-X”, “M02-A” y “M03-S”. Se los clasificó como aditivos reductores de viscosidad los dos primeros y como disolvente de asfaltenos el último, debido a la composición química de cada uno identificada en los ensayos FT-IR.

De los tres aditivos, el más eficiente en cuanto a reducción de viscosidad del crudo fue el aditivo “M01-X” con un porcentaje de reducción de 65,0 % a una concentración del aditivo de 3 000 ppm. Respecto a las muestras de crudo agregadas la mezcla de los aditivos (M02-A+M03-S), se tuvo como resultado una reducción de viscosidad mayor a las muestras que contenían solo un aditivo, con 69,2 % de reducción.

La adición de los tres reductores de viscosidad y la mezcla de los reductores (M02-A+M03-S) mejoraron la calidad del crudo, aumentó la gravedad API y contribuyó a la estabilidad de la fracción de asfaltenos. La mezcla de aditivos fue la que tuvo un cambio de propiedades más favorable, con un aumento de gravedad API de 16,0 a 18,5; con una reducción del porcentaje de la fracción de asfaltenos de 13,11% a 9,27 % y con mejora de la estabilidad de los asfaltenos y, por tanto, del crudo.

Con respecto a la evaluación de la facilidad de transporte, el aditivo “M01-X” y la mezcla de los aditivos (M02-A y M03-S) tuvieron los mejores resultados, con un aumento del caudal de las muestras de crudo en el banco de pruebas, desde un caudal de crudo sin aditivo de 1,242 mL/s a un caudal de 2,030 y 2,717 mL/s respectivamente. Además, se tuvo como resultado la disminución de la presión del sistema de 60 psi a 42 y 40 psi respectivamente.

#### REFERENCIAS

- Abarasi, H. (2013). A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 4(3). DOI: 10.1007/s13202-013-0086-6
- Aisling Chem. (2018). Reductores de viscosidad para petróleo pesado. Recuperado de: <https://www.aislingchem.com/es/products/reductores-de-viscosidad-para-petroleo-pesado/> . Junio, 2019
- Abarca, A. (2016). Estudios del efecto de reductores de viscosidad en crudo pesado (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Akbarzadeh, K., Hammami, A., Kharrat, A. Z., Allewnson, S., Creek, J., y Solbakken, T. (2007). Los asfaltenos: Problemáticos pero ricos en potencial. *OilField Review*, 24-47. Recuperado de: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/p22-43-spanish> . Julio, 2019
- Alfonso, H., Hernández, A., y Mediaceja, Y. (2017). Modelado de la viscosidad aparente de un petróleo crudo de 11 °API con comportamiento no newtoniano. *Ingeniare*. 25 (4). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000400674>
- Allenson, S., Yen, A., y Lang F. (2011). Application of Emulsion Viscosity Reducers to Lower Produced Fluid Viscosity. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference 1*. DOI: 10.4043/22443-MS
- Ancheyta, J., Trejo, F., y Singh Rana, M. (2009). *Asfaltenos: chemical transformation during hydroprocessing of heavy oils* (1era. ed). Puerto España, Trinidad y Tobago: Taylor & Francis Group
- Ardilla, J., y Pacheco, J. (2017). Análisis del comportamiento de la viscosidad de un crudo extrapesado con la aplicación de reductores de viscosidad, polímeros, derivados del petróleo y productos orgánicos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Venezuela
- ASTM. (2012). ASTM D287 “Método de prueba estándar para determinar la gravedad API del petróleo crudo y productos derivados del petróleo (Método del Hidrómetro)”. Recuperado de: <https://compass.astm.org/bvirtual.epn.edu.ec/download/D287-SP.1403.pdf>. Agosto, 2019
- ASTM. (2016a). ASTM D 2007 – 03 “Standard Test Method for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils and Other Petroleum-Derived Oils by the Clay-Gel Absorption Chromatographic Method”. Recuperado de: <https://compass.astm.org/download/D2007-03.6762.pdf>. Agosto, 2019
- ASTM. (2016b). ASTM D 1370 /D1370M “Standard Test Method for Contact Compatibility Between Asphaltic Materials (Oliensis Test)”. Recuperado de: <https://compass.astm.org/bvirtual.epn.edu.ec/download/D1370D1370M.31845.pdf>. Agosto, 2019
- ASTM. (2018). ASTM D2196 “Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer”. Recuperado de: [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?D2196+18e1](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D2196+18e1). Agosto, 2019
- Atkins, P., y de Paula, J. (2009). *Elements of Physical Chemistry*. 5ta edición. W.h. Freeman.
- ATSDR (2016). *ToxFAQs-Xileno(Xylene)*. Recuperado de [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts71.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts71.html). Agosto, 2019
- Banco Central del Ecuador. (2018). Reporte del sector petrolero II trimestre de 2018. Recuperado de: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ASP201806.pdf> Quito. Julio, 2019
- Barraza, G., de la Rosa, L., Martínez, A., Castillo, H., Cotte, M., y Alvarez, E. (2013). La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicos. *Revista Latinoamericana de Química*. 41 (3). Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-59432013000300001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-59432013000300001). Agosto, 2019

- Becerra, S. (2019). Nuestro vivir en la Amazonía ecuatoriana: entre la finca y el petróleo. Quito: ABYA AYALA. <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/articla/viewFile/1148/1540>. Marzo, 2020
- Bensakhria, A., Peysson, Y., y Antonini, G. (2004). Experimental study of the pipeline lubrication for heavy oil transport. *Oil & Gas Science and Technology*. 59(5), 523-533. DOI: 10.2516/ogst:2004037.
- Briceño, M. (2007). Evaluación de los reductores de viscosidad en crudos pesados de occidente (tesis de pregrado). Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela.
- Cavazos, J., Pérez, B., y Mauricio, A. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*. 11 (4). Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/317441991\\_Afectaciones\\_y\\_consecuencias\\_de\\_los\\_derrames\\_de\\_hidrocarburos\\_en\\_suelos\\_agricolas\\_de\\_Acatzingo\\_Puebla\\_Mexico/fulltext/59eea833aca272029ddf7a05/Afectaciones-y-consecuencias-de-los-derrames-de-hidrocarburos-en-suelos-agricolas-de-Acatzingo-Puebla-Mexico.pdf](https://www.researchgate.net/publication/317441991_Afectaciones_y_consecuencias_de_los_derrames_de_hidrocarburos_en_suelos_agricolas_de_Acatzingo_Puebla_Mexico/fulltext/59eea833aca272029ddf7a05/Afectaciones-y-consecuencias-de-los-derrames-de-hidrocarburos-en-suelos-agricolas-de-Acatzingo-Puebla-Mexico.pdf). Agosto, 2019
- Chavéz, T., Zamudio, L., y Barba, V. (2013). Aromatic polyisobutylene succinimides as viscosity reducers with asphaltene dispersion capability for heavy and extra-heavy crude oils. *Energy and fuels*. 27(4), 1994-2001. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef301748n>
- Cortés, C. (2017). Técnicas para mejorar el transporte de crudos pesados por oleoductos (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Delgado, J. (2006). Asfaltenos: composición, agregación, precipitación. Recuperado de: <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S369A.pdf>. Julio, 2019
- Ekos. (2018). Guía de negocios: Ekos. Obtenido de Ekos Web site: <https://www.ekosnegocios.com/novip/champion-technologies-del-ecuador-sa-championtech>. Julio, 2019
- En Ecuador hay un derrame petrolero por semana. *Diario El Universo*. (2019) Recuperado de <https://www.eluniverso.com/noticias/2014/06/11/nota/1026781/ecuador-hay-derrame-petrolero-semana>. Agosto 2019
- EPPetroecuador. (2019a). Informe estadístico Enero-Diciembre 2018. Ecuador: Jefatura Corporativa de Planificación.
- EPPetroecuador. (2019b). Informe estadístico Enero-Marzo 2019. Ecuador: Jefatura Corporativa de Planificación.
- García, C., Cáceres, O., Hernández, F., Afanador, L., Rodríguez, L., Casallas, P., y Cruz, G. (2010). Optimización del Transporte por Oleoducto de Crudo Pesado Castilla. *El Reventón Energético*. 8(1). 21-27. Recuperado de:
- Ghloum, E., Rashed, A., Al-Jasmi, A., Al-Ali, A., Mali, P., y Sanyal, A. (2015). Selection of Suitable Viscosity Reducer to Facilitate Test Production of Heavy Oil and Deep Reservoir. Society of Petroleum Engineers. DOI: <https://doi.org/10.2118/175312-MS>.
- Gurif Professional. (2002). Pipeline Rules of Thumb Handbook: Quick and accurate solutions to your everyday pipeline problems. E.W.McAllister.
- Halloran, M. (2015). Incorporative Production Additives Lower HSE Concerns & Improve Processes. UPSTREAM PUMPING. Recuperado de: <http://www.upstreampumping.com/article/2015/incorporative-production-additives-lower-hse-concerns-improve-processes/> Mayo, 2020.
- Hamed, F., Kasem, H., y Akbar, V. (2016). A comprehensive experimental evaluation of asphaltene dispersants for injection under reservoir conditions. *Petroleum Science*, 280-291. DOI 10.1007/s12182-016-0078-5
- Iturbe, R., Flores, C., Castro, A., y Torres, L. (2007). Sub-soil contamination due to oil spills in zones rrounding oil pipelines-pump stations and oil supipelines right-of-ways in Southwest-Mexico. *Environ Monit Assess*, 387-398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9593-y>.
- Johnston, R., Lauzon, P., y Pierce, J. (2008). Enhance the flow and reduce the drag. *Hydrocarbon Engineering*. 89-92. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/293706928\\_Enhance\\_the\\_flow\\_and\\_reduce\\_the\\_drag](https://www.researchgate.net/publication/293706928_Enhance_the_flow_and_reduce_the_drag). Marzo, 2020.
- Langevin, D., Poteau, S., Henaut, I., y Argillier, J. (2004). Crude oil emulsion properties and their application to heavy oil transportation. *Oil & Gas Science and Technology*. 59(59), 511-521. DOI: 10.2516/ogst:2004036.
- Martín, I., Salcedo, R., y Font, R. (2011). MECÁNICA DE FLUIDOS:Tema1. Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles. Recuperado de: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/1/tema1\\_Flujo%20interno.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/1/tema1_Flujo%20interno.pdf). Marzo, 2020.
- Martínez, R., Mosqueira, M., Zapata, B., Mar, E., Bernal, C., Clavel, J., Aburto, J. (2010). Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 75(3-4) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.020>
- Mena, V., López, S., Zamudio, L., Douda, Y., Lozada, M., Morales, A., . . . Bárcenas, M. (2007). México Patente nº WO2009078694A1.
- Moreira, A. y Mena, S. (2018). Análisis de las Condiciones de Operación en Estado Estable de Estaciones Reductoras de Presión en Oleoductos. *Revista Politécnica*. 42(1). 47-52. Recuperado a partir de

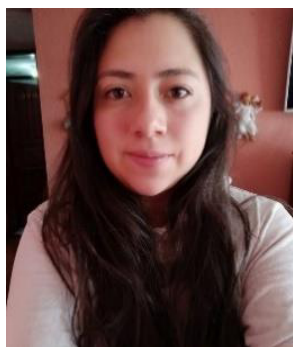
- [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/970](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/970)
- NCYT Amazings. (2015). Química: Científicos mexicanos logran reducir la viscosidad de crudos pesados en un 90%. Obtenido de NCYT Amazings web site: <https://noticiasdelaciencia.com/art/13352/cientificos-mexicanos-logran-reducir-la-viscosidad-de-crudos-pesados-en-un-90->. Julio 2019
- Oñate, J., y Rodríguez, R. (2012). Evaluación de las alternativas de transporte de crudo pesado por tuberías: caso aplicado al campo Rubiales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Venezuela
- OilFlux. (2014). Resultados de la Prueba W20. Recuperado de: <http://www.oilfluxamericas.com/extraction-wells-testresults-w20-sp.php>. Mayo, 2020.
- Pacheco, M. (5 de junio de 2019). Contaminación por derrame de crudo del bloque Yuralpa, en Napo. Diario El Comercio. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/contaminacion-derrame-crudo-napo-petroamazonas.html>. Agosto, 2019.
- Peralta, A., Blanco, J., Reina, J., y Mantila, L. (2017). Transporte de crudo pesado por oleoducto usando el método de dilución: Un enfoque práctico para modelar la caída de presión y la precipitación de asfaltenos. El reventón energético. 15(2), 7-17. DOI: <https://doi.org/10.18273/revfue.v15n2-2017001> (Agosto, 2019)
- Plitt, L. (2010). ¿Cuál es el verdadero impacto de un derrame de petróleo?. Noticiero de la BBC Mundo, Medio Ambiente. Obtenido de: [https://www.bbc.com/mundo/internacional/2010/04/100428\\_derrame\\_petroleo\\_claves\\_lp](https://www.bbc.com/mundo/internacional/2010/04/100428_derrame_petroleo_claves_lp). Agosto, 2019.
- Producción del ITT es 80% agua y 20% petróleo. (2018). Diario El Universo. Recuperado de <https://www.eluniverso.com/noticias/2018/11/19/nota/7057962/produccion-itt-es-80-agua-20-petroleo>. Julio, 2019
- QUIRED. (2019). Absorciones IR para grupos funcionales representativos. Recursos educativos de química orgánica. Recuperado de [https://www.ugr.es/~quirored/lab/tablas\\_espec/ir.htm](https://www.ugr.es/~quirored/lab/tablas_espec/ir.htm). Marzo, 2020.
- Remolina, S., Espitia, J., Luna, C., y Patiño, E. (2019). Una mirada al desarrollo de aditivos reductores de viscosidad y sus aplicaciones en el transporte de crudos pesados. Revista Ion. 32(1). 35-48. DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v32n1-2019003>
- Rogel, E., Miao, T., Vien, J., y Roye, M. (2015). Comparating asphaltenes deposit versus crude oil. Fuel. 147, 155-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.045>
- Rosero, P. (2012). Desarrollo de un algoritmo y programa en MATLAB para sistematizar y automatizar un modelo digital hidrodinámico en estado estable de un oleoducto para transporte de crudo liviano (tesis de postgrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Saravia, J. (2015). Dos caminos, un destino: el ANOVA de dos vías. Recuperado de Stats SOS web site: <https://statssos.net/2015/03/30/dos-caminos-un-destino-el-anova-de-dos-vias/>. Agosto, 2019
- Schlumberger. (2006). La importancia del petróleo pesado. Recuperado de: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/heavy-oil-3-spanish>. Mayo, 2020
- Secretaría de Hidrocarburos . (2017). Cifras Estimadas de Reservas de Petróleo por Categoría. Ecuador .
- Serway, R., y Faughn, J. (2001). Física. (5ta Edición). Pearson Educación de México, S.A. Ciudad de México, México.
- Serrano, J. (2010). Curso: Instrumentación y métodos de análisis químico. Posgrado en Ingeniería del agua y del terreno. Recuperado de [https://www.upct.es/~minaees/espectroscopia\\_infra-roja.pdf](https://www.upct.es/~minaees/espectroscopia_infra-roja.pdf) Mayo, 2020.
- Sinopec Exploration & Production. (2012). Reductor de viscosidad bifásico para crudos pesados. Recuperado de: <http://www.iapg.org.ar/seccionalsur/NUEVA/Jornadas2012/Trabajos/21-Reductor%20de%20Viscosidad%20Bifasico%20para%20crudos%20pesados.pdf>. Junio, 2019
- Subiaga, A., y Cuattrocchio, A. (2006). Partes fundamentales y reología de asfaltos para uso vial. Centro de Investigaciones Viales UNT Reg. La Plata. Argentina. Recuperado de: <https://web.archive.org/web/20061208170635/http://www.frlp.utn.edu.ar/lemac/Publicaciones/Del%2005/007%20-%20cila%20reologia.pdf>. (Agosto, 2019)
- Streter, V. (2003). Mecánica de Fluidos. (9na Edición). Ediciones Castillo SA, Madrid, España.
- Vivanco, A. (2011). Modelación del tramo Páramo-Puerto Quito del OCP S.A (Oleoductos de Crudos Pesados), mediante el programa Pipelinestudio (tesis de postgrado). Escuela Politecnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Wauquier, J. (2004). El Refino del Petróleo: Petróleo Crudo, Productos Petrolíferos, Esquemas de Fabricación. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España.
- Yu, G., Karinshak, K., Harwell, J., Grady, B., y Ghosh, M. (2014). Interfacial behavior and water solubility of various asphaltenes at high temperature. Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 441. 378-388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.09.020>
- Zahan, M., Bjorndalen, N., e Islam, M. (2004). Detection of precipitation in pipelines. Petrol. Sci, 22. DOI: <https://doi.org/10.1081/LFT-200034063>

Zamarripa, O. (2013). Determinación de una correlación para obtener la distribución de pesos moleculares de agregados de asfaltenos a partir de la caracterización de aceites crudos y sus mezclas (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México. págs., 28-30

Zambrano, M. (2015). Aseguramiento de flujo en el transporte de petróleo pesado – disminución de caudal. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.

Zhang, S., y Huang, H. (2005). Geochemistry of Palaeozoic marine petroleum from the Trin Basin, NW China: Part 1. Iol family classification. Journal of the European Association of Organic Geochemistry. 36. 1204-1214 DOI:10.1016/j.orggeochem.2005.01.013

## BIOGRAFÍAS



**Viviana Isabel Piedra Montoya.** Ingeniera química graduada de la Escuela Politécnica Nacional 2020. Área de investigación en reductores de viscosidad para crudo pesado y con experiencia en el campo ambiental. Trabajé como asistente técnica en la Fundación Futuro Latinoamericano para el Proyecto Plan de Acción para el componente de Adaptación de la

NDC. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-1648>



**Marcelo Fernando Salvador Quiñones.** Ingeniero químico graduado de la EPN 2006 y Máster en sistema de transporte de petróleo y sus derivados graduado de la EPN 2012. Trabajé como analista de metalografía y corrosión en el Laboratorio de Metalografía de la EPN desde 2009 hasta 2012. Trabajé en el sector petrolero como inspector QAQC de tuberías de pozo y perforación, herramientas de

perforación, cementación y completación para Petroamazonas. Desde octubre del 2014 trabajo en la EPN como docente y jefe del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química. Identificador ORCID: 0000-0003-4613-3311



**Liliana Guzmán Beckmann.** Ingeniera Química de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador. Master en Diseño de Procesos, Universidad Central del Ecuador (UCE). Ingeniera de campo de registros eléctricos en pozos en perforación y en producción de petróleo, Baker Hughes. Gerente de Logística y Procesos para trazar el combustible ecuatoriano para prevenir y controlar el contrabando y desvío de derivados del petróleo, Decipher C.A. Actualmente, profesora del Departamento de Ingeniería Química de la EPN, investiga temas relacionados con petróleo, combustibles y biocombustibles. ORCID: 0000-0003-1623-4015



**Roque Santos.** Nació en Quito en 1983. Se graduó como ingeniero químico de la Escuela Politécnica Nacional en marzo de 2009. En el 2010 obtuvo la maestría en Ingeniería Nuclear y Aplicaciones por la Universidad Autónoma de Madrid. Se incorporó en el año 2010 a la Escuela Politécnica Nacional como docente del Departamento de Ciencias Nucleares. En el año 2017 obtiene su Doctorado en

Ingeniería Nuclear en la Universidad de Tennessee en Knoxville. La investigación del Dr. Santos se centra en la detección de radiaciones aplicada a la Ingeniería Química. Número ORCID: 0000-0002-4202-5818



**José Iván Chango Villacís.** Especialista en Técnicas de Análisis Químicos CIAP-EPN. Doctor en Química, Magister en Química Analítica por la Universidad Central del Ecuador, Asesor de empresas privadas en el ámbito de formulaciones de cauchos. Número Orcid: 0000-0002-4391-5775



# Modelización Econométrica de los Accidentes de Tránsito en el Ecuador

Castillo, Daniela <sup>1</sup> ; Coral, Christopher <sup>1</sup> ; Salazar Méndez, Yasmín <sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Ingeniería en Ciencias Económicas y Financieras, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias, Departamento de Economía Cuantitativa, Quito, Ecuador.

**Resumen:** Los accidentes de tránsito constituyen una gran problemática de salud pública en el mundo. Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) anualmente mueren cerca 1.3 millones de personas por causas relacionadas con accidentes de tránsito. Adicionalmente, según el mismo organismo, anualmente, entre 20 y 50 millones de personas sufren heridas o quedan discapacitadas producto de un accidente de tránsito. En el Ecuador, los accidentes de tránsito constituyen una gran problemática económica, social y de salud pública, siendo una de las principales causas de muerte. Durante los últimos años, la tasa de fallecidos por accidentes de tránsito ha ido en aumento, convirtiendo al Ecuador en uno de los países con mayor tasa de mortalidad de América Latina. En este artículo se analizan los accidentes de tránsito desde dos enfoques: i) pronóstico de accidentes de tránsito, ii) determinantes humanos y físicos de mayor incidencia en los siniestros de tránsito considerando los cuatro tipos de vehículos más utilizados en el Ecuador: motocicletas, vehículos livianos, comerciales, de pasajeros y pesados. Para esto se estimó un modelo ARIMA siguiendo la metodología de Box-Jenkins y un modelo logit multinomial, respectivamente. Los datos fueron proporcionados por la Policía Nacional y corresponden al periodo 2015, 2016, 2017 y 2018.

**Palabras clave:** Accidentes de tránsito; Box-Jenkins; Modelo logit multinomial; Ecuador.

## Econometric Modeling of Traffic Accidents in Ecuador

**Abstract:** Traffic accidents constitute a major public health problem in the world. According to estimates of the World Health Organization (WHO, 2017), nearly 1.3 million people die annually from causes related to traffic accidents. Additionally, according to the same organization, annually, between 20 and 50 million people suffer injuries or become disabled as a result of a traffic accident. In Ecuador, traffic accidents constitute a major economic, social and public health problem, being one of the main causes of death. In recent years, the death rate from traffic accidents has been increasing, making Ecuador one of the countries with the highest mortality rate in Latin America. In this article, traffic accidents are analyzed from two perspectives: i) forecast of traffic accidents, ii) human and physical determinants of greater incidence in traffic accidents considering the four types of vehicles most used in Ecuador: motorcycles, lightweight vehicles, commercial, passenger and cargo vehicles. For this, an ARIMA model was estimated following the Box-Jenkins methodology and a multinomial logit model, respectively. The data was provided by the National Police and corresponds to the period 2015, 2016, 2017 and 2018.

**Keywords:** Traffic accidents; Box-Jenkins; Multinomial logit model; Ecuador.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes de tránsito constituyen una gran problemática de salud pública en el mundo. Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017), anualmente mueren cerca 1.3 millones de personas por causas relacionadas con accidentes de tránsito. Adicionalmente, según el mismo organismo, entre 20 y 50 millones de personas sufren heridas o quedan discapacitadas producto de un accidente de tránsito cada año.

En el Ecuador, los accidentes de tránsito son considerados la sexta causa de muerte (INEC, 2017). De acuerdo con los datos

de la Dirección Nacional de Control del Tránsito y Seguridad Vial de la Policía Nacional del Ecuador, en 2018, se reportó un total de 10 329 víctimas de accidentes de tránsito y, de este grupo, 1 817 fallecieron. Las estadísticas presentadas por el INEC muestran que, en 2015, la tasa de fallecidos fue de 6%, es decir, 1 038 fallecidos de 17 492 accidentes. En 2016 y 2017, esta tasa se mantuvo entre 6 % y 7 %. Por último, en comparación con el resto del mundo, el Ecuador tiene una tasa promedio de mortalidad de 20.1 fallecidos semanales y la media mundial es de 18 personas (INEC, 2017).

A pesar de que, en la primera mitad de la última década, la cantidad de accidentes de tránsito se redujo, -en 2010 y 2013

\*yasmin.salazar@epn.edu.ec

Recibido: 01/11/2019

Aceptado: 05/10/2020

Publicado: 30/11/2020

10.33333/rp.vol46n2.02

CC BY 4.0

se reportó un total de accidentes de 25 588 y 22 559, respectivamente; en los años posteriores, esta cantidad ha ido en aumento. Así, en 2014 se suscitaron 38 658 accidentes y, en 2017, esa cifra se ubicó en 26 291.

En el Ecuador, la ocurrencia de accidentes distinguiendo el tipo se presenta de la siguiente manera: 1) choques (45.4 %); 2) atropellos (16.8 %), 3) estrellamientos (13.6 %); 4) pérdida de pista (10.8 %) y otro tipo (13.8 %) (INEC, 2018).

En lo que respecta a las causas de los accidentes de tránsito, el 63 % se debe a la falta de atención de los conductores (por imprudencia o inobservancia a las señales de tránsito) (INEC, 2018).

Un análisis realizado por el mismo organismo para determinar el tipo de vehículos más común en siniestros de tránsito muestra que el 30 % pertenecen a automóviles y jeeps. La causa que justificaría este hecho es que este tipo de vehículos son los más utilizados por los ecuatorianos. En 2018, el parque automotor del Ecuador estaba constituido por 2' 403 651 vehículos matriculados con la siguiente distribución: 31.2 % son automóviles; 24.2 % motocicletas; 18.5 % camionetas; 16.5 % transporte de pasajeros; y, el 9.6 % son tráileres, tanqueros, volquetas, entre otros (INEC, 2018).

En este artículo se analizan los accidentes de tránsito en el Ecuador considerando dos enfoques diferentes. Primero, utilizando la metodología de Box-Jenkins se realiza un pronóstico de la cantidad de accidentes de tránsito. Adicionalmente, a través de la estimación de un modelo logit multinomial se determinan los factores humanos y físicos que inciden en la ocurrencia de siniestro de tránsito distinguiendo el tipo de vehículo. En ambos análisis se utilizaron los datos proporcionados por la Dirección Nacional de Control del Tránsito y Seguridad Vial de la Policía Nacional. Los datos tienen una periodicidad semanal y corresponden a los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Los hallazgos de este estudio contribuyen con información que puede auxiliar el diseño de políticas de seguridad vial. El artículo está organizado de la siguiente manera. Después de esta sección introductoria, se expone una revisión de la literatura en la sección 2. Luego, se presenta la descripción de los datos y de las metodologías usadas en el análisis. A continuación, en la sección 4 se presentan los resultados de las estimaciones de los modelos de series temporales y logit multinomial, respectivamente. Finalmente, la última sección contiene las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Entre los factores que más inciden sobre la probabilidad de ocurrencia de un accidente de tránsito se mencionan a: características individuales (la edad y el sexo); ambientales y características de la vía. El tipo de vehículo también aparece entre los factores reportados por la literatura relacionada con el análisis de los accidentes de tránsito.

En lo que respecta a los factores individuales, la edad, el sexo y conductas de riesgo de los conductores serían determinantes para la ocurrencia de un accidente de tránsito. Chang y Yeh (2017), en un estudio realizado para Taiwán, sugieren que las

personas más jóvenes y los hombres tienen más probabilidad de desobedecer las normas de tránsito y de subestimar los posibles riesgos de la conducción y, por tanto, individuos con estas características estarían más propensos a sufrir un accidente de tránsito.

Considerando el tipo de vehículo, las motocicletas aparecen en los primeros lugares en los accidentes de tránsito, sin embargo, este hecho estaría asociado a que corresponden a uno de los transportes más usados en algunos países. Por ejemplo, en Singapur, las motocicletas son uno de los tipos de medios de transporte más usados. Los accidentes en motocicletas estarían explicados por factores como: las características de la vía, medidas de control de tránsito y factores ambientales (como conducir en la noche o en clima lluvioso) (Hoong et al., 2012).

Los accidentes de tránsito pueden ser considerados fatales o no dependiendo de las secuelas presentes en las víctimas. Wu (2012) analiza la gravedad de las lesiones de los conductores que sufrieron un choque en las zonas urbanas y rurales de Nuevo México y examina varios factores relacionados con las características del vehículo, del entorno y comportamiento del conductor. Los resultados del autor sugieren que las malas condiciones de la vía, la presencia de múltiples curvas en una carretera y el uso de drogas por parte de los conductores aumentan la probabilidad de que un accidente de tránsito sea de tipo fatal (fallecimiento de alguna de las víctimas). Por otro lado, Yasmín (2014), en un análisis realizado para Bangladesh, determinó que la trayectoria del movimiento del vehículo, conducir excediendo los límites de velocidad, la edad del conductor y el no usar cinturones de seguridad incrementan la probabilidad de que un accidente sea de tipo fatal. Entre los factores que, según el autor, reducirían la gravedad de las lesiones de un conductor se incluyen a los controles de peatones en la vía, la presencia de redondeles y vías en buen estado.

## 3. DATOS Y METODOLOGÍA

### 3.1 Datos

La base de datos que se utilizó para esta investigación fue proporcionada por la Dirección Nacional de Control del Tránsito y Seguridad Vial de la Policía Nacional. Para realizar el pronóstico de los accidentes de tránsito se utilizó la cantidad de accidentes semanales suscitados durante los años 2015, 2016, 2017 y 2018. Para el análisis de los determinantes de la ocurrencia de un accidente de tránsito se trabajó únicamente con los datos del año 2018.

El registro de la información de los accidentes de tránsito se realiza en el Formulario de Registro de Accidentes de Tránsito (FRAT). Este formulario tiene como propósito registrar los datos relacionados con los accidentes de tránsito que ocurren en el país.

El levantamiento de la información se efectúa en el momento que ocurre el accidente; para esto, se procede a levantar un parte policial que legitima la ocurrencia del siniestro; si, en el instante del accidente, los entes de control no disponen de un sistema de almacenamiento ingresan y validan la información en el Sistema Nacional de Estadísticas de Tránsitos (SINET).



Previo a la estimación de los modelos se efectuó la depuración de la base de datos con el fin de identificar datos perdidos. La presencia de estas observaciones con información faltante se debe a que, una vez suscitado el accidente de tránsito, para realizar el registro y levantamiento de la información por parte de los agentes de tránsito de la Dirección Nacional de Control de Tránsito y Seguridad Vial puede transcurrir el tiempo suficiente como para que los implicados en el accidente puedan darse a la fuga.

### 3.2 Modelos Autorregresivos de medias móviles

Los modelos autorregresivos de medias móviles, conocidos como la metodología de Box-Jenkins, se basan en que cada variable  $y_t$  se explica por sus valores pasados o rezagados y por los términos de error estocástico. La metodología de Box-Jenkins es una de las más populares para la modelización econométrica de series temporales (Gujarati y Porter, 2009).

Según Enders (2015) un modelo autorregresivo de media móvil (ARMA) tiene la forma:

$$y_t = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i y_{t-i} + \sum_{i=0}^q \beta_i \varepsilon_{t-i} \quad (1)$$

Donde:  $\beta_0 = 1$ .

La parte autorregresiva del modelo corresponde al término que contiene los rezagos de  $y_t$ , mientras que, la parte de media móvil son los rezagos del error contemporáneo. Si las partes autorregresiva y media móvil contienen  $p$  y  $q$  rezagos, respectivamente, el modelo se denomina ARMA (p, q).

Si las raíces características de la ecuación (1) están dentro del círculo unitario, se dice que  $\{y_t\}$  es un modelo ARMA de  $y_t$ . Esto implica que la parte autorregresiva es estacionaria y la parte de media móvil invertible. Si una o más de las raíces características de la ecuación (1) están fuera del círculo unitario, se dice que  $\{y_t\}$  es un proceso integrado de (1) y se denomina modelo autorregresivo integrado de medias móviles integrado (ARIMA). En este caso los parámetros son  $(p, d, q)$ , donde  $d$  representa el número de veces que se debe diferenciar la serie para volverla estacionaria.

Para la modelización de (1) se utiliza la metodología de Box-Jenkins, misma que considera cuatro etapas:

1. Identificación: se encuentran los valores adecuados de  $p$  y  $q$ . Para esto se utilizan la función de autocorrelación simple (fas) y la función de autocorrelación parcial (fap) y los correlogramas, es decir, los gráficos de fas y fap. Para sintetizar el comportamiento de fas y fap que permiten identificar los valores  $p$  y  $q$  se considera lo siguiente:

AR(p): se observa una disminución exponencial en los valores de los rezagos de la fas y un corte abrupto en el rezago  $j=p$  de fap.

MA(q): en fas los picos son significativos hasta  $j=q$  y fap tiene una disminución exponencial.

ARMA (p, q): se observa un decrecimiento exponencial en los rezagos de fas y fap.

Este comportamiento se observará únicamente en series estacionarias. Si esta es no estacionaria, se debe convertirla en estacionaria antes de aplicar la metodología, es decir, esta debe ser diferenciada. El análisis de estacionariedad de una serie se puede realizar con los correlogramas y con las pruebas de raíz unitaria de Dickey-Fuller (DF) y Phillips Perron (PP).

2. Estimación de los parámetros del modelo elegido: una vez identificados los valores  $p$  y  $q$  se estima el modelo. La estimación se realiza por métodos de estimación no lineal (en parámetros).
3. Diagnóstico: para verificar si los residuos del modelo estimado son de ruido blanco; si no lo son, se debe regresar a la etapa 1 y proponer un nuevo modelo.
4. Pronóstico: consiste en realizar un pronóstico para los valores futuros de la serie  $y_t$ .

### 3.3 Modelo logit multinomial

Los modelos de regresión con respuesta cualitativa contienen variables dependientes que no son cuantitativas. Cuando las variables de respuesta son de tipo categórico, pero sin considerar ninguna jerarquía, es decir son de tipo nominal, se usan los modelos logit multinomial (o probit).

La metodología que se explica a continuación se basa en Greene (2002). Suponga que un individuo puede elegir entre  $j$  opciones:  $a, b$  y  $c$ , no ordenadas. Las diferentes elecciones se representan por:

$$y_a = x'_a \beta_a + \varepsilon_a \quad (2)$$

$$y_b = x'_b \beta_b + \varepsilon_b \quad (3)$$

$$y_c = x'_c \beta_c + \varepsilon_c \quad (4)$$

Donde:  $\{\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c\}$  son los efectos asociados a la decisión  $y$ , no observados.

Si  $x'_a \beta_a + \varepsilon_a \geq \max\{x'_b \beta_b + \varepsilon_b, x'_c \beta_c + \varepsilon_c\}$ , entonces,  $y = 0$ .

Si  $x'_b \beta_b + \varepsilon_b \geq \max\{x'_a \beta_a + \varepsilon_a, x'_c \beta_c + \varepsilon_c\}$ , entonces,  $y = 1$ .

Si  $x'_c \beta_c + \varepsilon_c \geq \max\{x'_a \beta_a + \varepsilon_a, x'_b \beta_b + \varepsilon_b\}$ , entonces,  $y = 2$ .

Existen dos efectos no observados independientes:

$$\varepsilon_{01} = \varepsilon_a - \varepsilon_b \quad (5)$$

$$\varepsilon_{02} = \varepsilon_a - \varepsilon_c \quad (6)$$

Definiendo:

$$x'_a \beta_a - x'_b \beta_b = x' \beta_{01} \tag{7}$$

$$x' \beta_a - x'_c \beta_c = x' \beta_{02} \tag{8}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \Pr(y = 0|x) &= \Pr(x' \beta_{01} + \varepsilon_{01} \geq 0, x' \beta_{02} + \varepsilon_{02} \geq 0|x) \\ &= \Pr(\varepsilon_{01} \geq -(x' \beta_{01}), \varepsilon_{02} \geq -(x' \beta_{02})|x) \end{aligned} \tag{9}$$

Se debe modelar la probabilidad de que un individuo de características  $x$  pertenezca a la categoría  $j$ :  $\Pr(y = j|x)$ . el modelo logit multinomial se expresa como:

$$\Pr(y = 0|x) = 1 - \Pr(y = 1|x) - \Pr(y = 2|x) \tag{10}$$

$$\Pr(y = 1|x) = \frac{\exp(x' \beta_1)}{1 + \exp(x' \beta_1) + \exp(x' \beta_2)} \tag{11}$$

$$\Pr(y = 2|x) = \frac{\exp(x' \beta_2)}{1 + \exp(x' \beta_1) + \exp(x' \beta_2)} \tag{12}$$

Después de la estimación se deben realizar pruebas para verificar su correcta especificación. Los análisis realizados en este trabajo son: variable omitida (RESET) y heteroscedasticidad (Breush-Pagan).

### 4. RESULTADOS

#### 4.1 Pronóstico del número de accidentes de tránsito

Para pronosticar el número de accidentes de tránsito se estima un modelo usando la metodología de Box- Jenkins.

##### 4.1.1 Identificación

La Figura 1 muestra la serie de accidentes de tránsito semanales desde, periodo 2015 – 2018. En la Figura 1 se puede observar una tendencia decreciente a lo largo del periodo observado. Con respecto al análisis de estacionariedad, en la Tabla 1 se presentan los resultados de las pruebas de raíz unitaria de Dickey-Fuller y Phillips-Perron. Aunque el p-valor de la prueba DF permite rechazar al 1% la hipótesis nula (la serie es no estacionaria), el p-valor de la prueba PP lo hace al 5%, por tanto, se procedió a diferenciar la serie. Posteriormente, el análisis realizado a la serie diferenciada sugiere que esta ya es estacionaria y este resultado se corrobora por las dos pruebas (DF y PP).

Tabla 1. Pruebas de Raíz Unitaria

Prueba	Variable sin Diferenciar		Variable Diferenciada	
	Coficiente	Probabilidad	Coficiente	Probabilidad
Dickey-Fuller	-11.87	0.0000	-4.249	0.0005
Phillips-Perron	-24.78	0.0560	-245.616	0.0000

Elaborado por: Los Autores

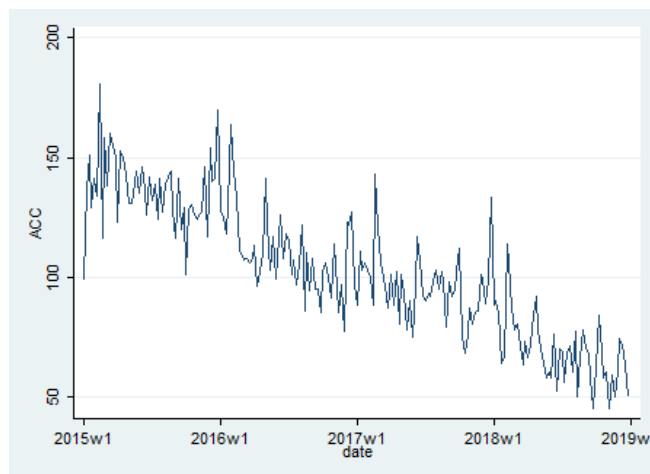


Figura 1. Número de Accidentes de Tránsito por semana 2015-2018  
Fuente: Policía Nacional

En el correlograma de la serie diferenciada, ver la Figura 2, se observa que las funciones de autocorrelación simple y parcial tienen un decrecimiento exponencial hacia cero y, en el caso de las también se puede evidenciar un corte abrupto. Por lo expuesto, se especifican los siguientes modelos ARIMA: ARIMA (1,1,0), ARIMA (1,1,1) y ARIMA (0,1,1).

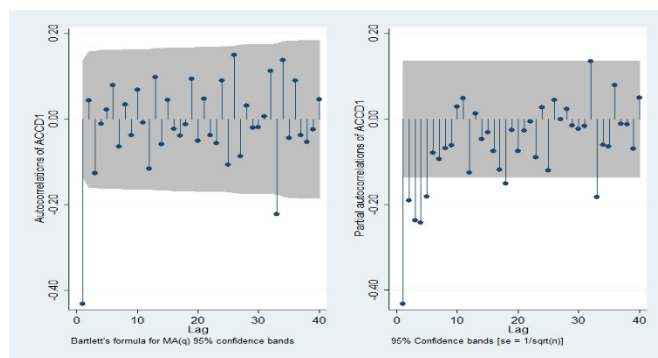


Figura 2. Funciones de autocorrelación simple y parcial de la serie diferenciada

Elaborado por: los Autores

##### 4.1.2 Estimación

Los resultados de los modelos estimados se muestran en la Tabla 2. La selección del mejor modelo se hizo considerando el criterio de información de Akaike (AIC), dando como resultado que la mejor especificación del modelo corresponde al modelo ARIMA (1,1,1).

Tabla 2. Resultados de las estimaciones

Variable Dependiente Diferenciada: Número de Accidentes			
Modelo	AR(1)	MA(1)	ARMA(1,1)
Variable	Coficiente	Coficiente	Coficiente
L1.ar	-0.4414 ***		0.2267 ***
L1.ma		-0.8844 ***	-1.0000
Muestra	207	207	207
BIC	1739.51	1698.662	1696.286
AIC	1729.51	1688.664	1682.956

Nota: \* p < 0.10, \*\* p < 0.05, \*\*\* p < 0.01

Elaborado por: Los Autores

4.1.3 Diagnóstico

En la Figura 3 se muestra el correlograma de los residuos del modelo propuesto y se puede concluir que los residuos son ruido blanco. Las barras de las funciones de autocorrelación simple y parcial son estadísticamente nulas. Adicionalmente, esto se confirma a través de la prueba de Portmanteau, obteniendo un p-valor de 0.3921 que, no permite rechazar la hipótesis nula de que los residuos siguen un proceso de ruido blanco.

En cuanto a la normalidad de los residuos, las pruebas de Jarque Bera y Shapiro Wilk evidencian normalidad en los residuos. Para verificar la autocorrelación se aplicó la prueba de Breusch Godfrey, el p-valor obtenido es de 0.4249 que no permite rechazar la hipótesis nula, de este modo se concluye que no existe autocorrelación en los residuos.

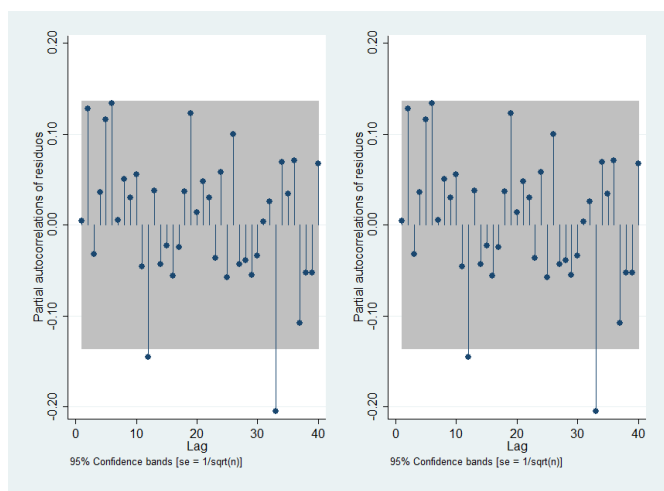


Figura 3. Correlograma de los residuos del Modelo ARIMA (1,1,1)  
Elaborado por: los Autores

Finalmente, en la Figura 4, se muestra el ajuste del modelo estimado considerando los valores observados y los valores pronosticados. Se puede observar que, en general, el modelo presenta un buen ajuste.

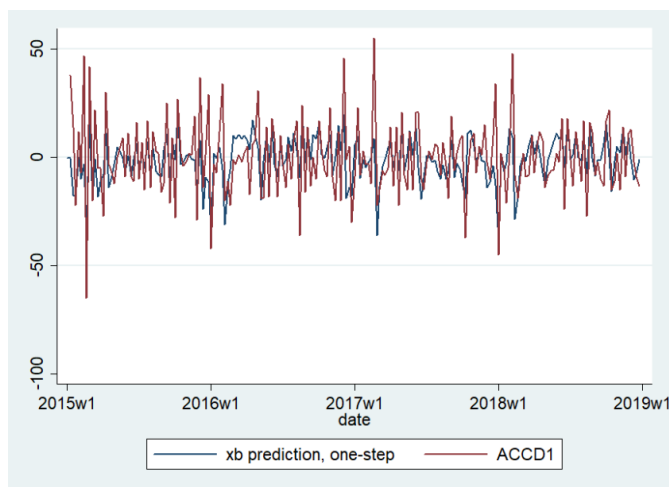


Figura 4. Ajuste del modelo ARIMA (1,1,1)  
Elaborado por: los Autores

4.1.4 Pronóstico

Para pronosticar el número de accidentes de tránsito se utilizó el modelo ARIMA (1, 1, 1). En el pronóstico de los accidentes de tránsito de las semanas: 1, 2, 3 y 4 para el año 2019; se observa un leve crecimiento. Los valores pronosticados de accidentes de tránsito para dichas semanas son:

- Primera Semana: 57 accidentes
- Segunda Semana: 59 accidentes
- Tercera Semana: 59 accidentes
- Cuarta Semana: 58 accidentes

Según los datos registrados por la Dirección Nacional de Control del Tránsito y Seguridad Vial de la Policía Nacional, los siniestros de tránsito para las cuatro primeras semanas del 2019 fueron:

- Primera Semana: 60 accidentes
- Segunda Semana: 63 accidentes
- Tercera Semana: 67 accidentes
- Cuarta Semana: 55 accidentes

4.2 Modelo logit multinomial

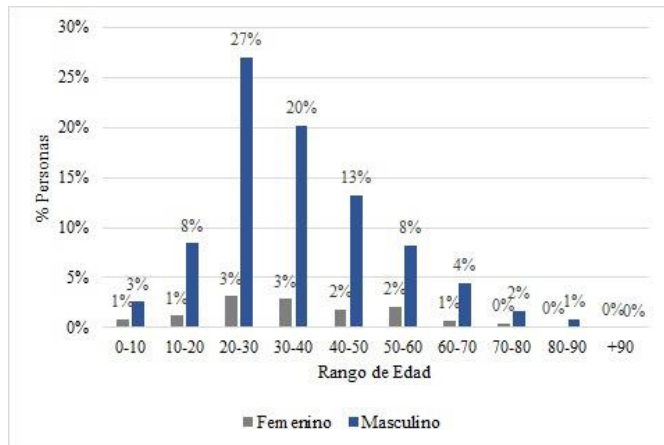
Para determinar los factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de un accidente de tránsito, considerando los distintos tipos de vehículos, se estimó un modelo logit multinomial. La selección de la metodología se justifica por la naturaleza de la variable dependiente, misma que contiene cinco categorías: motocicletas, vehículos livianos, vehículos comerciales, vehículos de pasajeros y vehículos de transporte de carga pesada. La categoría “livianos” está conformada por automóviles y jeeps, la categoría “comercial” abarca camionetas y vehículos que son de uso comercial, la categoría “pasajero” incluye autobuses; y, por último, la categoría “pesado” engloba tráileres, volquetas, unidades de carga, remolques y camiones. Para el análisis se toma como categoría base a los *vehículos livianos*.

De acuerdo con la estadística descriptiva de la variable, en 2018, 7 438 vehículos se vieron involucrados en un accidente de tránsito. De esta cantidad, 34 % son automóviles o “vehículos livianos”; seguido por las camionetas y vehículos de uso comercial (31 %). Los vehículos de transporte de pesado representan el 15 %, mientras que, las motocicletas tienen una participación del 12 %. Finalmente, los accidentes con vehículos de pasajeros representan el 8%.

Las variables independientes contienen características físicas y humanas: edad, sexo, estado de la persona, condición de la persona, clima, zona, accidente, causa del accidente.

Conforme con los datos proporcionados por la Dirección Nacional de Control del Tránsito y Seguridad Vial para el 2018, las personas registradas fueron 8 365, donde la edad de las personas involucradas en un siniestro de tránsito comprende desde los cero años, hasta los 99 años. En promedio, la edad de las personas involucradas en un accidente de tránsito es de 35 años. El porcentaje de mujeres que sufrieron un accidente de tránsito es de 13 % y el 87 % son hombres. Ver la Figura 5. Por otro lado, se observa que la mayor parte de los individuos están en los siguientes rangos de edad: 20 - 30 años, 30 - 40 años; y, 40 - 50 años.

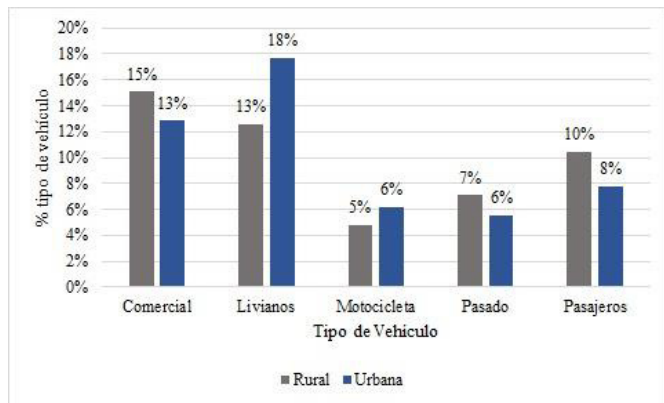
El estado de las personas luego del accidente de tránsito muestra que el 34% de los involucrados, salieron ilesos; el 44 % presentó alguna herida; mientras que el 22 % fallecieron.



**Figura 5.** Personas involucradas en un siniestro por sexo y edad  
Elaborado por: los Autores

De acuerdo con la condición de la persona se observa que el 65 % eran conductores; el 23 % pasajeros; y, 12% peatones y/o testigos.

En los 4 208 accidentes registrados por la Dirección Nacional de Control del Tránsito y Seguridad Vial de la Policía Nacional en 2008, se registra que el 88 % acontecieron en un clima despejado; el 10 % en un clima lluvioso; y, el 2 % en un clima nublado. El porcentaje de accidentes de acuerdo con el estado de la vía es: 5 % en adoquinado; 80 % en asfalto; y, 15 % en vías empedradas, lastradas y/o tierra. El porcentaje de accidentes que sucedieron en las áreas urbana y rural es similar, 50 % en cada zona.



**Figura 6.** Tipos de vehículos involucradas en un siniestro por zona  
Elaborado por: los Autores

La Figura 6 indica que los vehículos livianos son los que abarcan el mayor porcentaje con un 18 % de siniestros en zonas urbanas, mientras que en la zona rural esta cifra corresponde al 13 %. Por otro lado, se puede observar que el 15 % de los vehículos comerciales estuvieron involucrados en un accidente dentro de una zona rural, mientras que, el 13 % de estos siniestros se da en una zona urbana.

En cuanto a los vehículos pesados, el 6 % sufrió un accidente en una zona urbana y el 7 % en una zona rural. Con respecto a los vehículos de pasajeros, el 11 % sufrieron accidentes en zonas rurales y el 8 % en zonas urbanas. Finalmente, las

motocicletas tienen un menor porcentaje, el 5 % de este tipo de vehículos tuvieron un accidente de tránsito en zonas rurales en comparación al 6 %, que sufrieron algún tipo de accidente en zonas urbanas.

En cuanto a los tipos de accidentes, para el 2018, los atropellamientos fueron del 18 %; choques y colisiones fueron del 57 %; estrellamientos del 7 %; pérdidas de pista (12 %) y otros tipos del 6 %. La principal causa de los accidentes fue la falta de atención al conducir con 69 %. El resto de los accidentes corresponden a causas relacionadas con factores humanos viales y mecánicos.

Posterior a la estimación de los parámetros se realizó una serie de pruebas para garantizar una correcta especificación del modelo. Aplicando la prueba de RESET se encontró un problema de variable omitida, sin embargo, después de analizar los signos de los parámetros obtenidos se puede pensar que no hay un problema de sesgo debido a que el efecto obtenido en las estimaciones está acorde con la evidencia empírica. La prueba de Breush-Pagan arrojó la presencia de heteroscedasticidad, se corrigió este efecto estimando con errores robustos obteniendo estimadores insesgados y consistentes. Para verificar la significancia estadística de las variables se realizó la prueba de Walt, la cual muestra que todas las variables en conjunto son significativas; las variables explicativas tienen un efecto significativo en la probabilidad de ocurrencia de un accidente.

Con respecto al análisis de los resultados, que muestra la Tabla 3, se puede observar para el caso de los hombres es más probable que sufran un accidente de tránsito en motocicletas y vehículos de carga pesada en comparación a un automóvil.

Una vez suscitado el accidente de tránsito existe una mayor probabilidad de que la persona involucrada presente una herida cuando se moviliza en una motocicleta que cuando va en un automóvil. Además, existe una menor probabilidad de fallecer en un accidente cuando el accidente sucede en un automóvil en comparación con los demás vehículos.

En cuanto a la condición de la persona, los pasajeros que se movilizan en motocicleta tienen menor probabilidad sufrir un siniestro de tránsito que en un automóvil, sin embargo, existe una mayor probabilidad de sufrir un siniestro movilizándose en vehículos comerciales, en vehículos de pasajeros y en vehículos de transporte pesado.

En relación con las causas, los factores humanos como estado de embriaguez, exceso de velocidad o imprudencia del peatón, tiene una mayor probabilidad de causar un accidente de tránsito en los vehículos livianos que en el resto de las categorías, no obstante, los accidentes en motocicleta tienen una menor probabilidad de ser producto de daños mecánicos o daños en la vía en comparación a los demás vehículos.

Según los tipos de accidentes de tránsito, un atropello tiene menor probabilidad de ser provocado por los vehículos de pasajero, comerciales o vehículos pesados en contraste con los automóviles, no obstante, los automóviles tienen mayor probabilidad de sufrir un estrellamiento que los demás vehículos. Por otro lado, los vehículos de carga pesada tienen

una mayor probabilidad de sufrir un siniestro por pérdida de pista que los automóviles.

Considerando el clima, las motocicletas tienen menor probabilidad de ser partícipes de un accidente de tránsito que los automóviles, sin embargo, si el clima se encuentra nublado o con neblina, los vehículos de carga pesada, transporte de pasajeros y de comercio, tienen mayor probabilidad de sufrir un accidente.

En cuanto al tipo de vía, si esta es de adoquín u hormigón, las motocicletas son menos propensas a sufrir un accidente de tránsito que los automóviles, no obstante, los vehículos de transporte pesado son más propensos y esto se debe a que este tipo de vías no son adecuadas para estos vehículos. En las vías asfaltadas es más probable que los vehículos de transporte de carga y de pasajeros sufran un siniestro de tránsito en comparación con los vehículos livianos.

Distinguiendo las áreas, entre urbana y rural, los vehículos pesados y de pasajeros tienen una mayor probabilidad de sufrir un siniestro de tránsito en zonas rurales; esto podría explicarse por el hecho de que las condiciones del tránsito en estas zonas no son las mejores para este tipo de vehículos.

**Tabla 3.** Estimación del Modelo Logístico Multinomial

Clase de Vehículo	Motocicleta	Vehículo Comercial	Vehículo Pasajeros	Pesados	
<i>Variables de Factores Humanos</i>					
<b>Sexo</b>					
	Hombres	0.476 ***	0.004	0.549	0.575 ***
<b>Edad</b>		-0.015 ***	0.010 ***	-0.001 ***	0.011 ***
<b>Estado de la Persona</b>					
	Herido	1.885 ***	-0.048	0.827	0.139
	Fallecido	2.319 ***	0.234 **	1.605 **	0.702 ***
<b>Condición de la Persona</b>					
	Pasajero	-0.669 ***	0.355 ***	0.536 ***	0.604 ***
	Peatón o Testigo	-0.944 ***	0.019	0.940	-0.352 *
<b>Causa de Accidente</b>					
	Factores Humanos	-0.347 ***	-0.129 *	-0.280 *	-0.520 ***
	Vía y Daños Mecánicos	-0.556 **	-0.075	-0.501	-0.230
<b>Tipo Accidente</b>					
	Atropello	0.295	-0.590 ***	-0.471 ***	-1.037 ***
	Estrellamiento	-0.447 **	-0.638 ***	-1.141 ***	-1.165 ***
	Choque o Colisión	-0.121	-0.508 ***	-1.138 ***	-0.988 ***
	Pérdida de Pista	0.339	0.017	-0.423 **	1.165 ***
<i>Variables de Factores Físicos</i>					
<b>Clima</b>					
	Lluvia	-0.320 **	0.041	0.090	-0.125
	Neblina y Nublado	-0.470	0.430 **	0.640 **	0.416 *
<b>Tipo de Vía</b>					
	Adoquinado y Hormigón	-0.320 **	0.198	-0.091	0.684 ***
	Asfalto	-0.470	-0.066	0.262 **	0.227 *
<b>Área</b>					
	Rural	-0.035	0.376 ***	0.565 ***	0.502 ***
<b>Constante</b>					
		-1.985 ***	-0.806 ***	-2.281 ***	-2.247 ***
Número de Observaciones:	8365				
Correctamente Clasificado:	31.90%				
Pseudo R2:	0.075				
BIC:	-50666.489				
AIC:	2.866				

Nota: \* p < 0.10, \*\* p < 0.05, \*\*\* p < 0.01

Elaborado por: Los Autores

**Tabla 4.** Comparación de Modelos por Factores

	Modelo de Factores Humanos	Modelo de Factores Físicos	Modelo de ambos factores
Número de Observaciones	8365.000	8365.000	8365.000
% de clasificación	30.20%	29.80%	31.90%
BIC	-50864.204	-49921.231	-50666.489
AIC	2.876	2.992	2.866

Elaborado por: Los Autores

Finalmente, se analiza el efecto por factores físico y humano. En la Tabla 4 se muestra que tanto factores humanos y físicos son significativos.

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este artículo se estimaron dos modelos; el primero para pronosticar el número de accidentes de tránsito y el segundo para determinar los factores que inciden en la ocurrencia de un accidente de tránsito. A partir de los hallazgos se concluye que, en general, los factores humanos y físicos tienen efecto sobre los siniestros.

Los accidentes de motocicletas tienen más probabilidad de causar heridas o la muerte a sus víctimas al compararlos con los accidentes de vehículos.

En cuanto a los factores humanos, tales como: estado de embriaguez, exceso de velocidad o imprudencia del peatón, estos aumentan la probabilidad de ocurrencia de siniestros en vehículos livianos.

Por último, los factores climáticos. La presencia de neblina aumenta la probabilidad de accidentes en vehículos de carga pesada, de comercio y transporte de pasajeros. Considerando el tipo de vía, si esta es de hormigón, aumenta la probabilidad de accidentes para este tipo de vehículos, debido a que las llantas de estos vehículos pierden adherencia al piso. Adicionalmente, los resultados de la presente investigación reflejan que el estado de las vías es un factor clave para evitar accidentes, por tanto, los organismos responsables por el mantenimiento de las vías deben tener planes periódicos de mantenimiento de las vías

García et al. (2017), en un análisis sobre la percepción general de la seguridad vial en una ciudad ecuatoriana (Loja) encontraron que la mayoría de los encuestados discordaba de las leyes de tránsito, especialmente con las relacionadas con límites de velocidad y consumo de alcohol. Esto lleva a concluir a los autores la necesidad de implementar campañas de seguridad vial. En esta línea, las recomendaciones de este estudio también se enfocan en la importancia de la educación vial y el control en las vías orientado a revisar estos dos aspectos particulares.

Una de las limitaciones de este estudio es que la base proporcionada por la Dirección Nacional de Control de Tránsito y Seguridad Vial de la Policía Nacional del Ecuador no cuenta con información más completa de las personas accidentadas y las condiciones del accidente, así como del tipo de lesiones que tuvieron los involucrados, el nivel de educación de los accidentados, la calidad de la vía, el tipo de unión de la vía, entre otros. El contar con esta información permitiría realizar análisis más completos de los factores que intervienen en un siniestro. De esta forma, se recomienda que estos datos sean recolectados con el fin de realizar análisis más completos.

Para posteriores trabajos, se puede considerar posibles variables como: el nivel de las lesiones, historial de multas o infracciones, puntos en la licencia.

## REFERENCIAS

Chang, H.-L. (2006). Participación de accidentes de motociclistas por edad, género y conductas de riesgo en Taipei, Taiwán. *Science Direct*. 14,109-122

Dirección Nacional de Control del Tránsito y Seguridad Vial de la Policía Nacional del Ecuador. *Base de Datos de Personas, Vía y Vehículos 2015-2019*. (Julio, 2019)

Enders, W. (2015). *Applied Econometric Time Series*. University of Alabama. Cuarta edición. ISBN 978-1-118-80856-6.

García, Y., Zárate, B., Segarra, S., González, J. (2017). Percepción general de la seguridad vial en la ciudad de Loja (Ecuador). *Revista Cumbres* 4 (1), 9 – 16.

Greene, W. (2002). *Econometric Analysis*, Cuarta Edición. Pearson Edit. ISBN 0-13-066189-9

Gujarati, D., Porter, D. (2009). *Econometría*, Quinta Edición. McGraw-Hill/Irwin, Inc. ISBN: 978-607-15-0294-0

Haque, M., Chor, H. y Kumar, A. (2012). Una investigación sobre choques de motocicletas de varios vehículos utilizando modelos log-lineales. *Safety Science*. 50, 352-362

Hoong, C., Quddus, M., & Noland, R. (2002). Un análisis de lesiones en motocicleta y severidad de daños en vehículos usando modelos Probit ordenados. *Journal of Safety Research*. 33, 445-462.

INEC. (2017). Anuario de Estadísticas de Transporte ANET-2017. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador*. Obtenido de: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2017/2017\\_TRANSPORTE\\_PRESENTACION.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2017/2017_TRANSPORTE_PRESENTACION.pdf). (Julio, 2018).

INEC. (2018). Anuario de Estadísticas de Transporte 2018. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador* INEC. Obtenido de: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2018/2018\\_ANET\\_BOLETIN.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2018/2018_ANET_BOLETIN.pdf) (Octubre, 2019).

Montt, C., Rodríguez, N., Valencia, A., Barba, L. & Rubio, M. (2014). Regresión funcional para predecir lesionados en accidentes del tránsito de la región de Valparaíso de Chile. *Actas del Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*. Santiago, Chile, Paper 54.

OMS. (2017). Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial es hora de pasar a la acción. *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de:

[https://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/report/web\\_version\\_es.pdf?ua=1](https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/report/web_version_es.pdf?ua=1)

Yasmín, S. (2014). Factores que influyen en la gravedad de las lesiones de los conductores en Bangladesh. *Asian Transport Studies*. 3, 143-154.

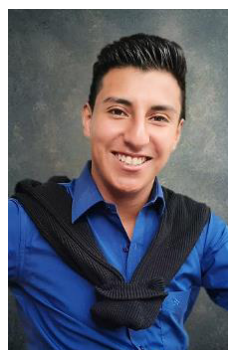
Wu, Q. (2016). Análisis de la gravedad de las lesiones al conductor en accidentes de un solo vehículo en zonas rurales. *Science Direct*, 94, 35-45.

## BIOGRAFÍAS



**Daniela Castillo Espinoza.** Estudiante de último año de la carrera de Ingeniería en Ciencias Económicas y Financieras de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional. ORCID:

<https://orcid.org/0000-0003-0777-9865>










**Christopher Coral Barahona.** Estudiante de último año de la carrera de Ingeniería en Ciencias Económicas y Financieras de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional. Identificador ORCID:

<https://orcid.org/0000-0001-6081-2754>



**Yasmín Salazar Méndez.** Desde 2015, es profesora titular de Econometría del Departamento de Economía Cuantitativa de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional. Doctora en Economía por la Universidad Federal Fluminense – Brasil (2015). Obtuvo una maestría en Ingeniería de Producción en la misma universidad (2008). Ingeniera Matemática graduada en la Escuela Politécnica Nacional (2003). Su investigación se centra en métodos cuantitativos y en la economía del bienestar, con énfasis en la desigualdad económica en América Latina. Identificador digital ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5909-9234>

# Ecuaciones de Bloch Ópticas en Sistemas Complejos con Acoplamiento Intramolecular

Paz, J. L.<sup>1,\*</sup> ; Ruiz-Hinojosa, E.<sup>1</sup> ; Alvarado, Y.<sup>2</sup> ; Lascano, L.<sup>1</sup> ; Fernández, Lenys<sup>3</sup> ; Espinoza-Montero, Patricio<sup>3</sup> ; Costa-Vera, César<sup>1</sup> 

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

<sup>2</sup>Laboratorio de Caracterización Molecular y Biomolecular (LCMB), Centro de Investigación y Tecnología de Materiales (CITeMA), Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) Región Zulia, República Bolivariana de Venezuela;

<sup>3</sup>Escuela de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador

**Resumen:** Proponemos modificaciones de las ecuaciones de Bloch ópticas convencionales para un sistema molecular, cuando consideramos los efectos de acoplamiento intramolecular. Modelamos la molécula aislada como curvas de energía de Born-Oppenheimer que consisten en dos estados electrónicos cruzados descritos como potenciales armónicos, con los mínimos desplazados en coordenadas nucleares y energía. Consideramos dos estados vibracionales y una perturbación, que puede surgir de una correlación residual electrón-electrón y/o términos de acoplamiento spin-órbita en el Hamiltoniano del sistema, causando la separación de las dos curvas según la regla del cruce evitado. Las ecuaciones extendidas de Bloch ópticas permiten establecer la dinámica de un sistema molecular de estados adiabáticos sujeto a la interacción de un reservorio térmico e interactuando con campos electromagnéticos. En las ecuaciones se observa que haciendo nulo el factor de acoplamiento intramolecular, se recuperan las ecuaciones de Bloch ópticas convencionales para un sistema molecular con potenciales armónicos cuyos mínimos se encuentran exactamente en la misma coordenada nuclear sujeto a la aproximación Born-Oppenheimer.

**Palabras clave:** acoplamiento intramolecular, ecuaciones ópticas de Bloch, adiabáticos, Born-Oppenheimer

## On the Optical Bloch Equations in Complex Systems with Intramolecular Coupling

**Abstract:** We propose modifications of the conventional optical Bloch equations for a complex system, when we consider intermolecular coupling effects. We model the isolated molecule as Born-Oppenheimer energy curves consisting of two-electronic states described as harmonic potentials, with minima displaced in nuclear coordinates and energy. We consider two-vibrational states and we include non-adiabatic effects for this two states model. Inclusion of a residual perturbation  $\tilde{H}$ , which may arise from a residual electron-electron correlation and/or spin-orbit coupling terms in the Hamiltonian of the system, may couple the above electronic states, causing the separation of the two curves according to the avoided-crossing rule. The extended equations of optical Bloch allow to establish the dynamics of a molecular system of adiabatic states subject to the interaction of a thermal reservoir and interacting with electromagnetic fields. The equations show that by making the intramolecular coupling factor zero, the conventional optical Bloch equations are recovered for a molecular system with harmonic potentials whose minima are found in exactly the same nuclear coordinate subject to the Born-Oppenheimer approximation.

**Keywords:** intramolecular coupling, optical Bloch equations, non-adiabatic effects, Born-Oppenheimer

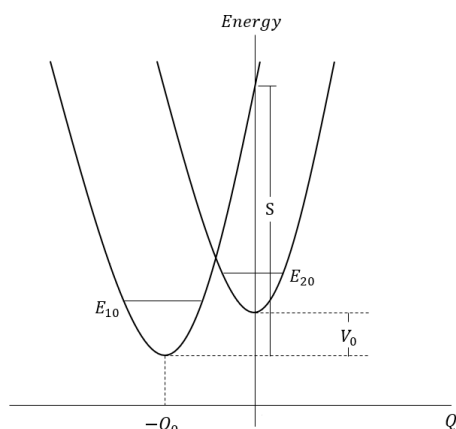
### 1. INTRODUCCIÓN

El modelo de dos estados para la descripción de los átomos y moléculas que interactúan con un campo electromagnético clásico ha demostrado ser útil en la óptica

no lineal. En una molécula, tales estados son generalmente pensados como estados vibracionales que pertenecen a una o dos superficies de energías potenciales. En este trabajo, consideramos sólo el segundo caso, pero tenemos en cuenta la posibilidad de un acoplamiento intramolecular directo de estado a estado. Este tipo de modelo que consiste en dos

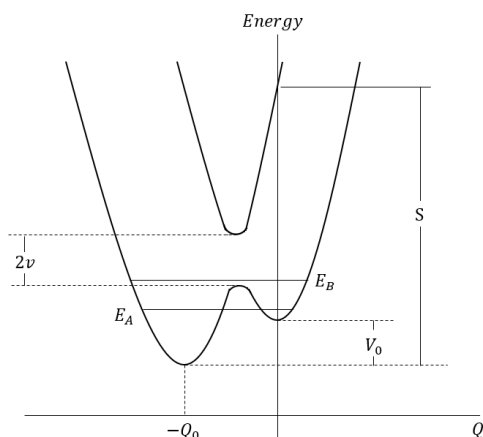
\* jose.pazr@epn.edu.ec  
Recibido: 15/06/2020  
Aceptado: 14/08/2020  
Publicado: 30/11/2020  
10.33333/rp.vol46n2.03  
CC BY 4.0

curvas electrónicas, ya sea degeneradas o no degeneradas para una pequeña región de valor de coordenadas nucleares, se ha aplicado al tratamiento de los efectos Jahn-Teller y pseudo-Jahn-Teller en las moléculas (García-Sucre y *col.*, 1970; Slivnev y *col.*, 2020) y al acoplamiento vibrónico que se produce para los estados excitados degenerados de los dímeros (Witkowsky y *col.*, 1960). Nuestro modelo consiste en dos estados electrónicos cuyas curvas de energía potencial se describen como osciladores armónicos desplazados en energía y coordenada nuclear. Consideramos la presencia de estados electrónicos moleculares con momentos dipolares permanentes no nulos. Nuestro sistema efectivo de dos niveles de estados vibratorios se describe en la Figura 1.



**Figura 1.** Representación diabática. Los mínimos de los dos potenciales están desplazados verticalmente en energía por  $V_0$  y horizontalmente por la distancia  $Q_0$ .

Esta descripción de los estados electrónicos entrecruzados corresponde a la llamada representación diabática. También se puede incluir una perturbación residual  $\tilde{H}$ , acoplando estos estados electrónicos. Las curvas anteriores pueden separarse según la regla de cruce evitado (Figura 2).



**Figura 2.** Representación adiabática. La perturbación residual que da lugar a la separación de las dos curvas armónicas se representa de acuerdo con una regla de cruce evitado.

Estos dos nuevos estados  $\{E_A, E_B\}$  del Hamiltoniano electrónico pertenecen ahora a la llamada representación adiabática y su forma depende del valor del elemento matriz no diagonal de  $\tilde{H}$ ;  $E_A$  y  $E_B$  denotan las energías vibrónicas resultantes después de la inclusión del acoplamiento  $\tilde{H}$ . El acoplamiento intramolecular es una herramienta fundamental para explicar las transiciones entre los estados electrónicos en los espectros de absorción y emisión que se suponía que estaban prohibidas por la simetría. Las descripciones teóricas de los procesos foto-físicos y fotoquímicos en la literatura implican el tratamiento de dos o más interacciones electrónico-vibratorias (Thoss y *col.*, 2000). El acoplamiento vibrónico, resultante del acoplamiento entre los movimientos nucleares y electrónicos en una molécula es de gran importancia para algunos procesos físico-químicos, por ejemplo, en el estudio de las tasas de relajación de la conversión interna (Mebel y *col.*, 1997), en el estudio de las probabilidades de transición débiles prohibidas por la simetría en los procesos de absorción y emisión, en la espectroscopia de femtosegundos (Domcke y Stock, 1997), en el estudio de la forma de la banda de absorción óptica de los dímeros (Pakhomov y *col.*, 1995) y en el estudio de las resonancias en los procesos de dispersión (Charutz y *col.*, 1997).

Nuestro sistema molecular ahora queda representado por un sistema de dos niveles no convencional, en el sentido que se lo describe en términos del acoplamiento intramolecular a través de sus estados adiabáticos. Considerando ahora este nuevo esquema, la dinámica temporal de este sistema en presencia de un baño térmico e interactuando con los campos electromagnéticos clásicos, se trata a través de las ecuaciones ópticas convencionales de Bloch, haciendo uso del formalismo de la matriz de densidad y de la ecuación de Liouville y Von Neumann. En este trabajo, proponemos una extensión de las ecuaciones ópticas convencionales de Bloch para sistemas complejos en presencia de acoplamientos intramoleculares.

## 2.1. REPRESENTACIÓN DIABÁTICA

La inclusión de la interacción entre el movimiento nuclear y electrónico en el cálculo de los valores y vectores propios del sistema molecular a través de  $H_T \Psi_T(r, Q) = E_T \Psi_T(r, Q)$  requiere, según la formulación general del modelo de acoplamiento intramolecular de Herzberg y Teller, poder expresar las funciones de onda electrónicas con una dependencia paramétrica en el espacio de las coordenadas nucleares  $Q$ . Estrictamente el término acoplamiento intramolecular se refiere a la corrección de las funciones de onda electrónicas de Born-Oppenheimer  $\Psi_T(r, Q) = \psi(r) \chi(Q)$  a fin de obtener información sobre la interacción entre los movimientos electrónicos y nucleares del sistema (Zhao y *col.*, 2020). Con este fin, el término de acoplamiento  $U(r, Q)$  se desarrolla en serie de Taylor para los



pequeños movimientos del núcleo alrededor de la configuración de referencia previamente elegida  $Q_0$ . Para simplificar, obtenemos

$U(r, Q) = U(r, Q_0) + \Delta U(r, Q)$ . En esta

representación, las coordenadas nucleares (en el espacio) se consideran fijas, introducidas en la función de onda  $\psi_k$  como parámetro. El movimiento de los electrones se obtiene con:

$$[H_{elect} + U(r, Q)]\psi_k(r, Q) = \varepsilon_k \psi_k(r, Q).$$

Ahora, la función de onda total se desarrolla como  $\Psi(r, Q) = \sum_k \chi_k(Q) \psi_k(r, Q)$ , donde  $\chi_k(Q)$  es una

función de onda vibracional en la representación diabática, calculada según

$$[T_N(Q) + \varepsilon(Q)]\chi_k(Q) + \sum_k W_{kn}(Q)\chi_n(Q)$$

$= E_T \chi_k(Q)$ , donde  $W_{kn}$  es el operador de acoplamiento no diabático.

## 2.2. REPRESENTACIÓN ADIABÁTICA

La función de onda electrónica se encuentra para una configuración nuclear específica  $Q_0$  que no necesariamente se refiere a la posición real del núcleo en el espacio, dada por

$$[H_{elect} + U(r, Q_0)]\psi_i^0(r, Q_0) = \varepsilon_i \psi_i^0(r, Q_0),$$

donde  $\psi_i^0(r, Q_0)$  son las funciones de onda electrónica diabáticas. La función de onda total, es

$$\Psi(r, Q) = \sum_i \chi_i(Q) \psi_i^0(r, Q_0) \text{ y finalmente,}$$

$$C_{ij}(Q) = \frac{\langle \psi_i^0(r, Q_0) | \Delta U(r, Q) | \psi_j^0(r, Q_0) \rangle}{\varepsilon_j^0 + \varepsilon_i^0} + \sum_{k \neq j} \frac{\langle \psi_i^0(r, Q_0) | \Delta U(r, Q) | \psi_k^0(r, Q_0) \rangle \langle \psi_k^0(r, Q_0) | \Delta U(r, Q) | \psi_j^0(r, Q_0) \rangle}{(\varepsilon_j^0 - \varepsilon_i^0)(\varepsilon_j^0 - \varepsilon_k^0)} + \dots$$

Las condiciones para el cruce de dos curvas de potencial adiabático de la misma simetría en un modelo de acoplamiento de dos estados, requiere

$$\Delta U_{ii}(r, Q) = \Delta U_{jj}(r, Q) \text{ y } \Delta U_{ij}(r, Q) = 0.$$

El cruce de superficies de energía potencial se asocia con los problemas de Jahn-Teller, donde las simetrías de estado generan intersecciones cónicas. La inestabilidad de algunas configuraciones nucleares produce una distorsión instantánea de su estructura que elimina la degeneración.

$$[T_N(Q) + \varepsilon_j(Q) + V(Q) + \langle \psi_j(r, Q) | \Delta U(r, Q) | \psi_j(r, Q) \rangle - E_T] \chi_j(Q) + \sum_{k \neq j} \langle \psi_j(r, Q) | \Delta U(r, Q) | \psi_k(r, Q) \rangle \chi_k(Q) = 0 \quad (1)$$

donde  $\langle \psi_j(r, Q) | \Delta U(r, Q) | \psi_k(r, Q) \rangle$  genera la superficie de energía potencial adiabática de los núcleos en el campo generado por los electrones. Por lo tanto, el valor de los elementos

$$\sum_{k \neq j} \langle \psi_j(r, Q) | \Delta U(r, Q) | \psi_k(r, Q) \rangle \chi_k(Q) = 0$$

mide el efecto del acoplamiento intramolecular (Mita y col., 2020). Finalmente, utilizando la teoría de perturbaciones de Rayleigh-Schrödinger, se obtiene la función de onda electrónica corregida:

$$\psi_i(r, Q) = \psi_i^0(r, Q_0) + \sum_{i \neq j} C_{ij}(Q) \psi_j^0(r, Q_0) \quad (2)$$

$$\Psi_T(r, Q) = [\psi_i^0(r, Q_0) + \sum_{i \neq j} C_{ij}(Q) \psi_j^0(r, Q_0)] \chi_j(Q) \quad (3)$$

donde:

## 3. MODELO DE ACOPLAMIENTO INTRAMOLECULAR

El Hamiltoniano asociado al sistema molecular en presencia de acoplamiento intramolecular se define como

$$H = H_0 + H(r),$$

donde  $H_0$  representa los dos osciladores armónicos desacoplados entre sí (sistema molecular de dos niveles con estados vibracionales sin acoplamiento intramolecular), y  $H(r)$  corresponde a un término residual de perturbación (dependiendo sólo de las coordenadas electrónicas) que induce el acoplamiento

intramolecular. Las funciones propias de  $H_0$  son  $|\psi_1\rangle$  y  $|\psi_2\rangle$ , donde  $H_0|\psi_2\rangle = E_{2k}|\psi_2\rangle$ , con estados electrónicos  $\{1, 2\}$  y estados vibracionales  $\{j, k\}$ . Para la inclusión de  $H(r)$  en el Hamiltoniano total, tenemos  $H|\psi_A\rangle = E_A|\psi_A\rangle$  y  $H|\psi_B\rangle = E_B|\psi_B\rangle$ . En la aproximación de Born-Oppenheimer  $|\psi_A\rangle = |\chi_{1j}\psi_1\rangle$  y  $|\psi_B\rangle = |\chi_{2k}\psi_2\rangle$ . El acoplamiento intramolecular está representado por los elementos no diagonales del operador residual:

$$\begin{aligned} \langle \chi_{1j}\psi_1 | H | \chi_{2k}\psi_2 \rangle &= W_{12} \\ &= v \langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $v = \langle \psi_1 | H | \psi_2 \rangle$ , con  $v$  como el coeficiente o parámetro de acoplamiento y  $\langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle$  la integral de solapamiento de los estados vibracionales. Los valores de energía y las correspondientes funciones propias pueden ser escritas de la forma:

$$E_B = \frac{1}{2} \left\{ (E_{1j} + E_{2k}) - \left[ (E_{1j} - E_{2k})^2 + 4v^2 \left| \langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle \right|^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (5.a)$$

$$E_A = \frac{1}{2} \left\{ (E_{1j} + E_{2k}) + \left[ (E_{1j} - E_{2k})^2 + 4v^2 \left| \langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle \right|^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (5.b)$$

Y

$$\begin{aligned} |\Psi_B\rangle &= |\Psi_B(r, Q)\rangle \\ &= C_{1j}^B [\psi_1(r; Q) \chi_{1j}(Q) \\ &+ A_{jk}^B \psi_2(r; Q) \chi_{2k}(Q)] \end{aligned} \quad (5.c)$$

$$\begin{aligned} |\Psi_A\rangle &= |\Psi_A(r, Q)\rangle \\ &= C_{1j}^A [\psi_1(r; Q) \chi_{1j}(Q) \\ &+ A_{jk}^A \psi_2(r; Q) \chi_{2k}(Q)] \end{aligned} \quad (5.d)$$

donde  $r$  y  $Q$  corresponden a las coordenadas electrónicas y nucleares, respectivamente, y donde se encuentran las siguientes cantidades:

$$\begin{aligned} E_{1j} &= \left( j + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_0, \quad E_{2k} = \left( k + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_0 + \\ V_0; \quad C_{1j}^A &= (1 + A_{jk}^A)^{-1/2}, \quad C_{1j}^B = (1 + A_{jk}^B)^{-1/2} \\ \text{con } A_{jk}^A &= \frac{E_{1j} - E_A}{v \langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle} \text{ y } A_{jk}^B = \frac{E_{1j} - E_B}{v \langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle}. \end{aligned}$$

Normalmente en los cálculos se utilizan algunos criterios que definen la intensidad de acoplamiento: débil  $\left( v \ll \frac{S\hbar\omega_0}{4} \right)$ , intermedio  $\left( v \approx \frac{S\hbar\omega_0}{4} \right)$  y fuerte  $\left( v \gg \frac{S\hbar\omega_0}{4} \right)$ , donde  $S = (m\omega_0/\hbar)Q_0^2$ ,  $m$  es la masa asociada al modo vibracional descrito por la coordenada nuclear  $Q$  y donde  $Q_0$  representa la separación de coordenadas de los dos mínimos de potenciales electrónicos. La frecuencia de Bohr  $\omega_0$  viene dada por  $\omega_0 = (E_{2k} - E_{1j})/\hbar$ . Ahora es necesario hacer una descripción de los momentos dipolares permanentes y de transición en los estados adiabáticos para la extensión de las ecuaciones ópticas convencionales de Bloch.

#### 4. MOMENTOS DIPOLARES PERMANENTES Y DE TRANSICIÓN EN LOS ESTADOS ADIABÁTICOS.

En nuestro modelo, los momentos dipolares permanentes y de transición entre los estados  $|\Psi_A\rangle$  y  $|\Psi_B\rangle$  se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{AB} &= -C_{1j}^A C_{1j}^B \left[ A_{jk}^A A_{jk}^B m_{22}(0) + m_{11}(-Q_0) \right] \\ &- C_{1j}^A C_{1j}^B m_{12}(-Q_0) \langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle (A_{jk}^B + A_{jk}^A) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{rr} &= (C_{1j}^r)^2 \left[ (A_{jk}^r)^2 m_{22}(0) + m_{11}(-Q_0) \right] \\ &- 2 (C_{1j}^r)^2 m_{12}(-Q_0) \langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle (A_{jk}^r) \end{aligned} \quad (7)$$

Con  $r = A, B$ , y donde  $m_{11}$  y  $m_{22}$  representan los momentos dipolares permanentes asociados a los estados desacoplados  $|\psi_1\rangle$  y  $|\psi_2\rangle$ . En este caso:

$$m_{ij}(Q) = \int \psi_i^*(r; Q) \hat{m} \psi_j(r; Q) d^3r \quad (8)$$

Donde  $m$  es el operador de momento dipolar electrónico, para valores  $i, j = 1, 2$ . El factor de solapamiento vibracional  $\langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle$  puede ser evaluado de acuerdo con la fórmula de Pekarian (Di Bartolo y Goldberg, 1980):

$$\langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle = \frac{(-1)^k}{(k!)^{1/2}} S^{k/2} \exp\left(-\frac{S}{4}\right) 2^{-k/2} \quad (9)$$

para  $j = 0$

Tenemos  $m_{11}$  y  $m_{22}$  evaluado en  $-Q_0$  y  $0$ , respectivamente, mientras que las Ecs. (6) y (7), y dado el principio de Franck-Condon  $m_{12}$  se evalúa en  $-Q_0$ . Esto equivale a evaluar los momentos permanentes y de transición en los estados desacoplados en la geometría de equilibrio. Sin embargo, estas geometrías se mezclan en la evaluación de los momentos en los estados acoplados. En las ecuaciones (6-8), primero observamos que, aun cuando los estados desacoplados tienen un momento dipolar permanente nulo  $m_{11} = m_{22} = 0$ , el acoplamiento induce un momento no nulo en los estados acoplados proporcionados  $m_{12} \neq 0$ . En segundo lugar, cuando  $m_{11}$ ,  $m_{22}$  son diferentes de cero, un caso importante en este trabajo, las contribuciones de  $m_{11}$  y  $m_{22}$  a  $\mu_{aa}$  ( $a = A, B$ ) pueden diferir sustancialmente debido tanto al factor de acoplamiento como al de Franck-Condon, mientras que la única manera en que los momentos del dipolo permanente  $m_{11}$  y  $m_{22}$  y contribuyen a  $\mu_{AB}$  es a través de la diferencia  $m_{11} - m_{22}$ . En particular, cuando  $m_{11} = m_{22} \neq 0$ , estos momentos del dipolo permanente contribuyen a  $\mu_{aa}$  ( $a = A, B$ ) haciendo  $\mu_{bb}$  diferente de  $\mu_{AA}$  lo cual tiene consecuencias importantes para las respuestas no lineales. En tercer lugar, el interesante efecto del momento de transición  $\mu_{AB}$  que va en sentido inverso al de los momentos del dipolo permanente mencionados anteriormente, según el cual  $\mu_{AB}$  puede desaparecer como efecto del acoplamiento intramolecular a pesar de que el momento del dipolo de transición en el estado desacoplado  $m_{12} \neq 0$ . Esto es,  $\nu = -m_{12}(E_{1j} - E_{2k}) / (m_{22} - m_{11})$  y considerando esta expresión para el degenerado, las condiciones para el efecto mencionado son: i) los dos estados mezclados por el acoplamiento intramolecular deben ser no degenerados; y ii) los signos de  $m_{12}(E_{1j} - E_{2k})$  y  $m_{22} - m_{11}$  deben ser opuestos. En

cuarto lugar, el caso degenerado,  $E_{1j} = E_{2k}$  merece una atención especial. En este caso  $\mu_{AB}$  y  $\mu_{aa}$  ( $a = A, B$ ) se convierten

$$\mu_{AB} = \frac{1}{2} [m_{11}(-Q_0) - m_{22}(0)] \quad (10)$$

$$\mu_{aa} = \frac{1}{2} [m_{11}(-Q_0) + m_{22}(0)] \pm [\langle \chi_{1j} | \chi_{2k} \rangle m_{12}(-Q_0)] \quad (11)$$

empleando el signo negativo en el estado  $|A\rangle$  y el signo positivo para el estado  $|B\rangle$ .

Los momentos de transición y de dipolo permanente son ahora independientes del acoplamiento  $\nu$ , además  $\mu_{AB}$ , no contiene ninguna contribución de  $m_{12}$ .

Estos resultados no se mantendrán exactamente para una función de onda más general:

$$\Psi(r, Q) = C_{ij} \psi_1(r; Q) \chi_{1j}(Q) + C_{2k} \psi_2(r; Q) \chi_{2k}(Q)$$

pero un argumento perturbativo indica que incluso para una mezcla más general, las ecuaciones. (10) y (11) se mantendrán aproximadamente si hay una contribución dominante de cualquiera de los dos estados degenerados.

## 5. ECUACIONES ÓPTICAS DE BLOCH EN ESTADOS ADIABÁTICOS

Es importante destacar que nuestro sistema molecular aislado es representado en la base adiabática correspondiente a los estados  $|A\rangle$  y  $|B\rangle$ . Para estudiar la extensión de las ecuaciones de Bloch ópticas convencionales, ahora en la base adiabática, este sistema que hemos descrito estará sujeto a la interacción por la presencia del solvente, y a una interacción radiativa por efecto de los campos electromagnéticos. En orden de describir la evolución temporal del sistema, hacemos uso de la ecuación de Liouville dada por  $i\hbar \partial_t \rho = [H, \rho]$ , donde  $\rho(t)$  es la matriz densidad reducida, mientras  $H$  es el Hamiltoniano total, el cual describe al soluto, solvente, campos electromagnéticos y todas las interacciones entre ellos, dado por  $H = H_S + H_F + H_R + H_{SF} + H_{SR} + H_{FR}$ . Ahora  $H_S$  corresponderá al Hamiltoniano del sistema aislado sujeto al efecto intramolecular y descrito por  $H_S = H_0 + H(r)$ ,

donde  $H_0$  corresponderá al Hamiltoniano en la base diabática, mientras que  $H(r)$  representará la perturbación relativa al acoplamiento intramolecular;  $H_R$  representa el Hamiltoniano del reservorio térmico, el cual es despreciado en el presente estudio;  $H_F$  corresponde al Hamiltoniano del campo electromagnético, el cual no tomamos en cuenta por la consideración de la aproximación semiclásica. Para completar la descripción espectroscópica de interacción radiación-materia, consideraremos  $H_{SF}$  para representar la interacción entre el soluto (sistema activo con acoplamiento intramolecular) y el campo, el cual describimos de acuerdo con la aproximación de tipo dipolar;  $H_{SR}$  representa la interacción soluto-solvente descrita en términos de los mecanismos de relajación, y finalmente  $H_{FR}$  que representa la interacción entre el campo de radiación y el solvente. Esta última interacción no la tomamos en cuenta, al considerar que la frecuencia del campo perturbador no es sintonizable o resonante a la frecuencia de respuesta del reservorio térmico. Normalmente se dice en este último que el solvente es transparente a la radiación, dado que no hay absorción. En orden de obtener la evolución temporal del sistema global, debemos considerar previamente algunas aproximaciones, algo más fundamentales. Suponemos un reservorio térmico con muchísimos grados de libertad, de forma que la interacción con el soluto la energía sea disipada rápidamente, haciendo que el reservorio permanezca en el régimen de equilibrio térmico. Este hecho se traduce en que  $\rho(t)_{S-R} = \rho(t)_S \otimes \rho(0)_R$ , además de considerar que el sistema en su interacción con el campo electromagnético pierde su memoria y evoluciona a partir del momento que interacciona con el campo. Esto último corresponde a la aproximación Markoviana. Una revisión más detallada de las restantes aproximaciones fundamentales que tienen lugar en este conjunto de interacciones puede ser revisada en la referencia (Blum, 1981). Considerando entonces las interacciones mencionadas, y haciendo uso de la teoría cuántica de relajación, la evolución temporal del elemento de matriz densidad reducida, sólo para el subsistema, queda expresada de la forma:

$$(\partial_t \rho_S)_{m'm} = -i\omega_{m'm} (\rho_S)_{m'm} - \frac{1}{\hbar} \langle m' | [H_{SF}, \rho_S] | m \rangle + \sum_{mn} R_{m'mn'n} (\rho_S)_{n'n} \quad (12)$$

donde  $R_{m'mn'n}$  es la matriz de relajación, cuya forma exacta puede ser vista en la referencia indicada, pero su deducción completa no es colocada en el presente trabajo. Nótese que la expresión (12) obedece a la evolución temporal de una parte reducida del sistema, adjudicada al subsistema, distinto a lo que ocurre en la ecuación de Liouville, la cual permite la evolución sólo de sistemas completos. Las ecs. (6) y (7) constituyen el punto central de este trabajo. En ellas

se incluyen los efectos de la base acoplada (acoplamiento intramolecular) sobre el sistema de dos niveles, el ensanchamiento homogéneo de la línea espectral y la interacción del sistema con el reservorio. En este trabajo, hemos considerado que la presencia del reservorio térmico no modifica parámetros fundamentales en la respuesta del soluto. El primer término de la ec.(12) describe el sistema molecular acoplado con su frecuencia de resonancia

$\omega_{m'm} = \omega_0$  (frecuencia de Bohr en la base adiabática); el segundo término es relativo a la interacción de carácter dipolar eléctrico entre el sistema y el campo de radiación, mientras que el último término, corresponde al mecanismo de relajación del sistema introducido en forma fenomenológico y representado por la matriz de Bloembergen del tipo  $R_{m'mn'n}$  (Blum, 1981). Con todas estas consideraciones en mente, la dinámica del sistema es obtenida resolviendo las siguientes ecuaciones de Bloch ópticas para los estados adiabáticos:

$$\partial_t \rho = M(t) \rho + R \quad (13)$$

donde

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{AB} \\ \rho_{BA} \\ \rho_D \end{pmatrix}; \quad M(t) = \begin{pmatrix} 0 & f(v) & \frac{i}{\hbar} \mu_{AB} E \\ f^*(v) & 0 & -\frac{i}{\hbar} \mu_{BA} E \\ -\frac{2i}{\hbar} \mu_{AB} E & \frac{2i}{\hbar} \mu_{BA} E & -\frac{1}{T_1} \end{pmatrix} \quad \text{con}$$

$$f(v) = i\omega_0 - \frac{1}{T_2} - \frac{i}{\hbar} dE$$

$$R = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_1} \rho_D^{(0)} \end{pmatrix}; d = \mu_{BB} - \mu_{AA}$$

donde  $f(v)$  es definida como la función de acoplamiento;

$\omega_0 = \frac{E_B - E_A}{\hbar}$  ; donde E es la amplitud del campo electromagnético;  $T_1$  y  $T_2$  representan los tiempos de relajación longitudinal y transversal, respectivamente;

$\rho_D \equiv \rho_{AA} - \rho_{BB}$  representan la diferencia de población entre los estados electrónicos adiabáticos; el superíndice (0) denota el valor de equilibrio en la diferencia poblacional en la ausencia de radiación. En términos del acoplamiento vibrónico, las cantidades de importancia que definen el Hamiltoniano de interacción radiación-materia, se definen de la forma:

$$\mu_{BA} = \left( \sqrt{\frac{v^2 e^{-S/2}}{4v^2 e^{-S/2} + \Delta^2}} \right) (m_{11} - m_{22}) - \Delta \left( \sqrt{\frac{e^{-S/2}}{4v^2 e^{-S/2} + \Delta^2}} \right) m_{21} \quad (14.a)$$

$$d = \frac{\Delta e^{S/2} (m_{11} - m_{22}) + 4vm_{21}}{\Delta^2 e^{S/2} + 4v^2} \sqrt{4v^2 e^{-S/2} + \Delta^2}$$

con  $\Delta = E_{1j} - E_{2k} = -\omega_0 \hbar$  (14.b)

$$\omega_0 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{\omega_0^2 \hbar^2 + 4v^2 e^{-S/2}} \quad (14.c)$$

Es posible recuperar la dinámica del sistema (en su conjunto con la presencia del reservorio térmico e interactuando con la perturbación radiativa) en la representación diabática, haciendo la perturbación  $H$  pequeña, por lo que  $v \rightarrow 0$ . Finalmente, las ecuaciones de Bloch ópticas convencionales en presencia del acoplamiento vibrónico, quedan definidas de la forma:

$$\partial_t \rho_{AB} = \left( i\omega_0 - \frac{1}{T_2} \right) \rho_{AB} + \frac{i}{\hbar} \left( \sqrt{\frac{v^2 e^{-S/2}}{4v^2 e^{-S/2} + V_0^2}} \right) \times \left( (m_{aa} - m_{bb}) + \frac{V_0}{v} m_{ba} \right) \rho_D E - \frac{i}{\hbar} \left( \frac{-V_0 (m_{aa} - m_{bb}) + 4ve^{-S/2} m_{ba}}{\sqrt{4v^2 e^{-S/2} + V_0^2}} \right) \rho_{AB} E \quad (15.a)$$

$$\partial_t \rho_D = -\frac{1}{T_1} (\rho_D - \rho_D^{(0)}) - \frac{2i}{\hbar} (\rho_{BA} - \rho_{AB}) \times \left( \sqrt{\frac{v^2 e^{-S/2}}{4v^2 e^{-S/2} + V_0^2}} \right) \left( (m_{aa} - m_{bb}) + \frac{V_0}{v} m_{ba} \right) \quad (15.b)$$

$$\partial_t \rho_{BA} = (\partial_t \rho_{AB})^* \quad (15.c)$$

Como puede observarse tanto en las coherencias como en las poblaciones, la dinámica queda definida en términos de los parámetros del acoplamiento, pero tiene información de las bases diabáticas como función de sus momentos dipolares. Tal como lo señalamos anteriormente, en la base diabática el sistema puede tener momentos dipolares permanentes nulos, y sin embargo el correspondiente momento dipolar en los estados adiabáticos no necesariamente son ceros. Esto obliga a que en el cálculo no se considere la aproximación de onda rotante y haya que incorporar en el cálculo todos aquellos términos de anti-resonancia. Sin embargo, en la representación adiabática esta consideración ya no es determinante y por ende los resultados pueden concebirse sin la consideración de inclusión de términos que están fuera de resonancia.

## 6. COMENTARIOS FINALES

El modelo presentado en esta contribución representa una generalización o extensión de las ecuaciones ópticas de Bloch convencional en el régimen local de propagación. Normalmente en este tipo de ecuaciones locales no se consideran de forma explícita los momentos dipolares permanentes, ya que considerarlos hace que el tratamiento sea muy complejo y extenso por no poder hacer uso de la aproximación de la onda rotante. En un esquema perturbativo, incluir términos de anti-resonancia y estar fuera de la aproximación mencionada, requiere consideraciones muy particulares para evaluar las convergencias de los términos que escalan muy rápidamente, por ejemplo, cuando se trata interacción radiación-materia en el caso de mezcla de ondas tipo Rayleigh. Sin embargo, nuestra propuesta al convertir a la nueva base de estados adiabáticos, permite incorporar de forma natural los dipolos permanentes, los cuales son funciones de los dipolos en la base diabática, y estos últimos, pueden o no ser iguales a cero, pero el tratamiento no requiere condiciones de estar fuera de la aproximación de onda rotante. Esto hace, que nuestra propuesta, sea de utilidad para el estudio de los procesos de absorción de dos fotones, que normalmente se le estudia bajo consideraciones explícitas de momentos dipolares permanentes distintos de cero y tomando en cuenta los términos de anti-resonancia. Nuestro modelo puede ser aplicado a moléculas que presentan efectos del tipo Jahn-Teller o en los casos de estados excitados de dímeros. La restricción se cumplirá para los estados vibratorios casi degenerados en el llamado caso de acoplamiento débil.

## AGRADECIMIENTOS

JLP agradece el financiamiento provisto por el Vicerrectorado de investigación, Innovación y Vinculación de la Escuela Politécnica Nacional a través del proyecto PII-DFIS-2019-2.

## REFERENCIAS

- Blum, K. (1981) *Density Matrix Theory and Applications*. Plenum Press
- Charutz, D.M.; Baer, R.; Baer, M. (1997). A study of degenerate vibronic coupling effects on scattering processes: are resonances affected by degenerate vibronic coupling?. *Chem. Phys. Lett.* 265(6), 629-637. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(96\)01494-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(96)01494-7).
- Di Bartolo B.; Goldberg, V. (1980) *Radiationless Processes*. Springer
- Domcke, W.; Stock, G. (1997). Theory of ultrafast non-adiabatic excited-state processes and their spectroscopic detection in real-time. *Adv. Chem. Phys.* 100, 1-169
- García-Sucre, M.; Goychman, F.; Lefebvre, R. (1970). Adiabatic corrections in a simple model of two-interacting electronic-potential curves. *Phys. Rev. A*, 2 (5), 1738-1745. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.2.1738>
- Mebel, A.; Hayashi, M.; Lin, S.H. (1997). Ab-initio calculations of vibronic coupling. Application to symmetry-forbidden vibronic spectra and internal conversion in ethylene. *Chem. Phys. Lett.* 274 (1-3), 281-292. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(97\)00654-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(97)00654-4)
- Mita, T.; Uchiyama, M.; Soto, Y. (2020). Catalytic intramolecular coupling of Ketoalkenes by Allylic  $c(sp^3)$ -H bond Cleavage: Synthesis of Five- and six-membered Carbocyclic compounds. *Advanced Synthesis and catalysis*, 362 (6), 1275-1280. <https://doi.org/10.1002/adsc.202000184>
- Pakhomov, A.; Ekbundit, S.; Lin, C.H.; Alden, R.G.; Lin, S. H. (1995). Effect of intermolecular vibronic coupling on non-radiative transitions and optical absorption of dimmers. *J. Lummin.* 63, 129-136
- Slivnev, V.V.; Dimenov, O.A.; Girichev, G.V. (2020). Jahn-Teller effect versus spin-orbit coupling: The structure of the free molybdenum pentafluoride molecule. *J. of Molecular Structure*, 1199, 126884 (11 pages). [10.1016/j.molstruc.2019.126884](https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.126884)
- Thoss, M.; Miller, W.H.; Stock, G. (2000). Semiclassical description of non-adiabatic quantum dynamics: Application to the  $S_1$ - $S_2$  conical intersection in pyrazine. *J. Chem. Phys.* 112, 10282-10292. <https://doi.org/10.1063/1.481668>
- Witkowsky, A.; Moffitt, W. (1960). Electronic spectra of dimmers: derivation of the fundamental vibronic equation. *J. Chem. Phys.* 33, 872-875. <https://doi.org/10.1063/1.1731278>
- Zhao, L.; Tao, Z.; Pavosevic F.; Wildman, A.; Hammes-Schiffer, S.; Li, X. (2020). Real-Time Time-dependent nuclear-electronic orbital approach: Dynamics beyond the Born-Oppenheimer approximation. *The Journal of Phys. Chem. Lett.* 11(10), 4052-4058. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.0c00701>

## BIOGRAFÍAS



**José Luis Paz.** Licenciado en Química (1983), M. Sc en Química (1985) y Doctorado en Química (Universidad Central de Venezuela, 1988). Postdoctorado en Optica Cuántica UNAM. Profesor Jubilado Emérito (2014)-de la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Individuo de Número de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Venezuela (2009). Investigador Senior Prometeo (2014-2017) Ecuador. Profesor Invitado adscrito al departamento de Física, EPN. Línea de investigación en Óptica No lineal y Óptica Cuántica. [https://www.researchgate.net/profile/Jose\\_Paz3/research](https://www.researchgate.net/profile/Jose_Paz3/research) <http://ORCID/0000-0002-6177-7919>



**Eleana de los Ángeles Ruiz Hinojosa.** Física graduada en la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Realizó su tesis de pregrado sobre óptica no lineal titulada "Efectos del acoplamiento intramolecular en el estudio de las respuestas ópticas no lineales en colorantes orgánicos en la señal de Mezcla de Cuatro Ondas". Tiene experiencia en estudios de espectroscopia, exfoliación de grafeno y la deposición de películas delgadas para la producción de celdas solares, además del manejo de varios lenguajes de programación, tales como: Fortran, Matlab, Mathematica, Python, C++. Sus intereses de investigación teórica y experimental son óptica no lineal y mecánica cuántica. <https://orcid.org/0000-0002-7063-3466>



**Ysaías J. Alvarado.** Licenciado en Química (1992) en la Universidad del Zulia, Venezuela. Doctorado en Química (1996) en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) bajo la supervisión del Dr. Roberto Sánchez Delgado. Profesor Titular de la Facultad Experimental de Ciencias (FEC) de la

Universidad del Zulia (LUZ). Fundador del Laboratorio de Electrónica Molecular en el Departamento de Química en dicha Universidad. Miembro fundador del Doctorado en Química en la FEC. Investigador Asociado Titular del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Fundador del Laboratorio de Caracterización Molecular y Biomolecular en el Centro de Investigación y Tecnología de Materiales (CITeMA) del IVIC. Jefe del Centro de Investigación y Tecnología de Materiales (CITeMA) del IVIC. <https://orcid.org/0000-0002-2709-409X>



**Luis Lascano Lascano.** Doctorado en Física de Materiales, Universidad Autónoma de Madrid e Instituto de Cerámica y Vidrio, España. Físico, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito.

Profesor Principal del Departamento de Física de la EPN. Miembro del Grupo de Investigación de Materiales Electrónicos y Magnéticos de dicho departamento. Las líneas de investigación que desarrolla son: Estudios teórico y experimental de Materiales Electrocerámicos Ferroeléctricos, y estudios teóricos en Óptica no lineal. <https://orcid.org/0000-0001-7588-0194>



**Mercedes Fernández.** Dra. en Química Aplicada. Experiencia en docencia universitaria a nivel de pre y post-grado. Investigación en Sensores y Biosensores electroquímicos, Técnicas de introducción de muestras en Espectroscopia de Absorción Atómicas para el

análisis de metales pesados en muestras de ambientales y/o de alimentos. Revisora de libros y artículos en revistas científicas indexadas. Autora de siete (7) libros, sesenta y dos (72) artículos científicos, tres (03) capítulos de libros, noventa ocho (98) asistencias a congresos en su área de

especialización y dos (02) premios por los mejores trabajos de investigación a nivel doctoral (ULA-Venezuela). Actualmente, profesora en la Escuela de Ciencias Química de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. ORCID: 0000-0001-6720-6343



**Patricio Javier Espinoza-Montero.**

Químico por la Escuela de Química de la Universidad Central del Ecuador (2007); Maestro en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (2009); Doctor

en Ciencias por UNAM (2014). Experto en Polímeros Conductores, Procesos de Oxidación Avanzados para el tratamiento de aguas residuales (Electrooxidación, Fotocatálisis, Fotoelectrocatalisis), Sensores, Biosensores, Inmunosensores, Electrospinning. Estancia de investigación (6 meses), Universidad Iberoamericana de México-Campus Santa Fe (2012). En 2013 realizó estancia de investigación de 6 meses en la Michigan State University-USA (Electroquímica Analítica). Destacan 42 artículos científicos publicado y dos capítulos de libro. Profesor en Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Escuela de Ciencias Químicas. ORCID: 0000-0003-0592-8652



**César Costa-Vera.** Físico (1992), graduado en la Escuela Politécnica Nacional, Doctorado en Física de Iones (1999) en programa cooperativo entre la Escuela Politécnica Nacional y la Universidad de Uppsala en Suecia. Posdoctorado (Beca Georg

Forster), Fundación Alexander von Humboldt, en Universidad de Giessen, Alemania. Miembro de la Academia de Ciencias del Ecuador. Líder del Grupo Mass Spectrometry & Optical Spectroscopy, EPN. Trabaja en óptica, fotónica, láseres y nanoespectroscopía. Profesor Principal del Departamento de Física de la EPN. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=15041572100>

<https://orcid.org/0000-0001-5242-1892>





# Comportamiento de las Paredes de Dominio Ferroeléctricas en una Nanoesfera de Titanato de Plomo

Andrade-Landeta, Julio<sup>1</sup> ; Lascano-Lascano, Luis<sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup>Colegio Politécnico, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Departamento de Física, Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador

**Resumen:** El objetivo del presente trabajo fue estudiar el comportamiento de las paredes de dominio ferroeléctricas en una nanoesfera de titanato de plomo bajo diferentes condiciones térmicas, eléctricas y mecánicas. Para ello se ha hecho uso de la teoría fenomenológica de Ginzburg-Landau y para obtener el estado de equilibrio se utilizaron principios variacionales; las ecuaciones que aparecen en el desarrollo se resolvieron analíticamente. Los resultados obtenidos proveen un perfil de la polarización dentro de las paredes de dominio  $180^\circ$  de la nanoesfera de titanato de plomo, así como el espesor de dicha pared en función de la temperatura y para distintas condiciones de la nanoesfera. Se observa que, con el aumento de la temperatura, el perfil de la polarización se reduce y el espesor de la pared crece al acercarse a cierta temperatura; todo lo cual permitiría sintonizar la temperatura de transición ferroeléctrica mediante el control del tamaño de la nanoestructura, de la presencia de cargas libres y de la aplicación de esfuerzos mecánicos.

**Palabras clave:** Pared de dominio, transición ferroeléctrica, titanato de plomo, polarización.

## Behavior of Ferroelectrics Domain Walls in a Lead Titanate Nanosphere

**Abstract:** The objective of the present work was to study the behavior of the ferroelectric domain walls in a lead titanate nanosphere under different thermal, electrical and mechanical conditions. For this, the phenomenological theory of Ginzburg-Landau has been used and variational principles were used to obtain the state of equilibrium; the equations that appear in development were solved analytically. The results obtained provide a profile of the polarization within the  $180^\circ$  domain walls of the lead titanate nanosphere, as well as the thickness of said wall as a function of temperature and for different conditions of the nanosphere. It is observed that, with the increase in temperature, the polarization profile decreases and the wall thickness increases as it approaches a certain temperature; all of which would allow tuning the ferroelectric transition temperature by controlling the size of the nanostructure, the presence of free charges and the application of mechanical stresses.

**Keywords:** Domain wall, ferroelectric transition, lead titanate, polarization.

### 1. INTRODUCCIÓN

Un dominio en una fase ferroica, como puede ser un material ferroeléctrico o uno ferromagnético, está definido como la región que contiene una configuración espacial local ordenada de un parámetro de orden, el cual puede ser la polarización o la magnetización, respectivamente. Los diferentes dominios son distinguibles por su orientación espacial del parámetro de orden.

La mayor parte de la investigación actual sobre aplicaciones de materiales ferroicos se enfoca en los límites entre dominios vecinos, también conocidos como paredes de dominio, por sus notables propiedades funcionales (Prando, 2017).

Existen diversas investigaciones acerca del uso de las paredes de dominio como elementos activos en dispositivos electrónicos, y muy particularmente en memorias no volátiles (Foerster et al., 2016; Salje, 2010; Li et al., 2005; Catalan et al., 2012; Grimley et al., 2018; Chopra et al., 2000); sin embargo, a pesar de varios avances en la manipulación de las paredes de dominio ferroeléctrico y en el control de su conductividad, los principios del funcionamiento en dispositivos de memoria aún no están completamente definidos (Prando, 2017).

El presente trabajo tuvo como objetivo modelar y estudiar teóricamente el comportamiento de las paredes de dominio de  $180^\circ$  en una nanoesfera ferroeléctrica de titanato de plomo ( $\text{PbTiO}_3$ ), dando así continuidad al trabajo de Andrade y

\*luis.lascano@epn.edu.ec

Recibido: 18/05/2020

Aceptado: 22/09/2020

Publicado: 30/11/2020

10.33333/tp.vol46n2.04

CC BY 4.0

Lascano (2017), donde se estudiaron los efectos que produce la disminución de tamaño de la nanoesfera, al estar sometida a la acción simultánea de campos de despolarización y de esfuerzos mecánicos. Aquí se buscó conocer el comportamiento de las paredes de dominio en la nanoesfera de titanato de plomo bajo la acción de los mismos campos.

Para la realización de este estudio se han tomado en cuenta varios trabajos sobre paredes de dominio (Lee et al., 2009; Pöykkö y Chadi, 1999; Meyer y Vanderbilt, 2002; Behera et al., 2011) realizados mediante primeros principios y con la teoría del funcional de la densidad, en los cuales se ha calculado el perfil de la polarización de pared de dominio para ciertos arreglos de celdas unitarias vecinas, tomando en cuenta el desplazamiento de los átomos dentro de la celda unitaria con parámetros macroscópicos fijos tales como la temperatura  $T = 0 K$  (Pöykkö y Chadi, 1999), es decir, dentro de un escenario estático de la fase ferroeléctrica. En cambio, aquí buscamos conocer el comportamiento de las paredes de dominio en función de la temperatura y bajo diversas condiciones de la nanoesfera de PT.

El conocimiento del comportamiento de las paredes de dominio de una nanoestructura ferroeléctrica puede utilizarse para predecir la respuesta piezoeléctrica de este tipo de cristales; como también puede ser de mucha ayuda en el diseño de cristales nanométricos para uso en dispositivos de alta piezoelectricidad, donde se aprovechan técnicas de ingeniería de configuración de dominio (Li y Chen, 2006; Wada et al., 2007; Bell et al., 2020; Lipatov et al., 2019; Jiang et al., 2018).

Los resultados obtenidos en este estudio muestran la influencia que tienen la temperatura, el tamaño de partícula y los esfuerzos mecánicos sobre el perfil de la polarización en la pared de dominio  $180^\circ$ , y sobre el espesor de dicha pared en una nanoesfera de titanato de plomo.

Estos resultados pueden ser útiles al estudiar la inversión de polaridad de los dominios ferroeléctricos bajo la acción de campos eléctricos externos en condiciones termo-mecánicas de funcionamiento, con miras a utilizar estos materiales en dispositivos tales como sensores, actuadores, memorias ferroeléctricas de acceso aleatorio. Además, son importantes los estudios a nivel nanométrico porque permiten la construcción de una alta densidad de memoria guardada en circuitos nano electrónicos (Faraji et al., 2017; Rojac y Damjanovic, 2017; Kumar et al., 2020; Scott et al., 2016; Chai et al., 2020).

El estudio aquí desarrollado pretende avanzar en la comprensión de las propiedades ferroeléctricas de un cristal a escala nanométrica.

## 2. METODOLOGÍA

La presente investigación de carácter teórico estudia el comportamiento de las paredes de dominio de una nanoestructura de titanato de plomo bajo diferentes condiciones. El sistema a estudiar consiste de las paredes de dominio  $180^\circ$  de una nanoesfera ferroeléctrica de titanato de plomo (PT), rodeada por una capa de cargas espaciales en su

superficie y sometida a la acción simultánea del campo de despolarización y de esfuerzos mecánicos.

El modelo teórico propuesto se fundamenta en la teoría fenomenológica de Ginzburg-Landau para cristales ferroeléctricos, tomando como parámetro de orden a la polarización del cristal. Entonces se plantea la densidad volumétrica de energía del sistema tomando en cuenta las magnitudes siguientes: la energía de un cristal mono axial simple ferroeléctrico bajo ausencia de campos eléctricos externos, la energía de despolarización generada por la formación de los dominios de  $180^\circ$  en la nanoesfera rodeada por una capa superficial de cargas libres, la energía provocada por la presencia de esfuerzos mecánicos y la energía de pared de dominio.

Posteriormente, se realiza un cálculo de tipo variacional buscando la configuración de equilibrio estable del sistema y, de allí, la polarización y el espesor de la pared de dominio. En ese desarrollo se llega a una ecuación diferencial compleja cuya solución se la encuentra mediante el uso de integrales elípticas de tercer orden. Así se obtiene una solución para el perfil de polarización de la pared de dominio y para el espesor de dicha pared. Finalmente se hace un análisis cuantitativo del comportamiento de la pared de dominio en función de parámetros variables tales como la temperatura, el diámetro de la partícula, el grosor de la capa de cargas libres que cubren la nanoesfera y los esfuerzos mecánicos, mediante el uso del lenguaje de programación Python.

### Densidad de energía libre

El análisis parte con la determinación de la densidad de energía libre de Ginzburg-Landau-Devonshire de la nanoesfera de PT, a la cual se añaden la densidad de energía de despolarización, la densidad de energía de paredes de dominio y la densidad de energía electro-elástica.

La densidad volumétrica de energía libre,  $F_p$ , de un cristal ferroeléctrico en ausencia de campos eléctricos externos se expresa como serie de potencias pares de la polarización  $P$  (Rabe et al., 2007):

$$F_p = \frac{1}{2}\alpha P^2 + \frac{1}{4}\beta P^4 + \frac{1}{6}\zeta P^6 \quad (1)$$

donde  $\alpha = \alpha_0(T - T_{0\infty})$  depende a la vez de la temperatura  $T$  de la nanoesfera y de la temperatura de transición  $T_{0\infty}$  del PT. Allí  $\alpha_0$ ,  $\beta$  y  $\zeta$  son coeficientes cuyos valores pueden obtenerse desde experimentos, o pueden calcularse por métodos de primeros principios (Lallart, 2011).

A la anterior densidad de energía se añade la densidad de energía de despolarización,  $F_d$ , debida al campo eléctrico de despolarización, la cual representa la energía eléctrica necesaria para la formación de los dominios de  $180^\circ$  en la nanoesfera (Andrade y Lascano, 2017):

$$F_d = \epsilon^* \frac{td}{D^2} \left[ 1 - e^{-2\pi\left(\frac{D}{a}\right)} \right] P^2 \quad (2)$$

donde  $\epsilon^* = \frac{4}{\epsilon_0 \pi^3}$ ,  $D$  es el diámetro de la nanoesfera de PT,  $d$  es el grosor de cada dominio de  $180^\circ$ . Además, allí se considera una nanoesfera cubierta por una capa de grosor  $t$  de cargas eléctricas espaciales.

Asimismo, también debe añadirse la densidad de energía  $F_\sigma$  correspondiente al efecto de esfuerzos mecánicos  $\sigma$  aplicados sobre la nanoesfera de PT, los cuales pueden también originarse en la transición desde una fase paraeléctrica cúbica a una fase ferroeléctrica tetragonal del PT. Ya que la fase ferroeléctrica del PT es tetragonal, su polarización está determinada únicamente por la componente  $P_3$  del campo de polarización  $\vec{P} = (0, 0, P_3)$ , (Sun et al., 2010), es decir,  $P = P_3$ . Además, al contrario de lo realizado en el trabajo de Cao y Cross (1991), aquí se toma en cuenta la condición hidrostática para los esfuerzos mecánicos, esto es:  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ ,  $\sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$ . Por lo tanto, la densidad de energía  $F_\sigma$  es (Andrade y Lascano, 2017):

$$F_\sigma = -\frac{3}{2}(s_{11} + s_{12})\sigma^2 - (Q_{11} + 2Q_{12})\sigma P^2 \quad (3)$$

donde los  $Q_{ij}$  son los coeficientes electrostrictivos.

De este modo, sumando las Ecuaciones (1), (2) y (3), obtenemos la energía libre por unidad de volumen, notada como  $F_1$ , de una nanoesfera ferroeléctrica con una estructura de dominios de  $180^\circ$ , su valor es:

$$F_1 = \frac{1}{2}\alpha P^2 + \frac{1}{4}\beta P^4 + \frac{1}{6}\zeta P^6 + \epsilon^* \frac{td}{D^2} \left[ 1 - e^{-2\pi(\frac{D}{d})} \right] P^2 - \frac{3}{2}(s_{11} + s_{12})\sigma^2 - (Q_{11} + 2Q_{12})\sigma P^2 \quad (4)$$

Todos los valores de los coeficientes que intervienen en la densidad de energía  $F_1$  de la Ecuación (4) aparecen detallados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros del cristal de titanato de plomo

Parámetro	Valor	Referencia
$T_{0\infty}$	752 K	Zhang et al. (2008)
$\alpha_0$	$7,6 \times 10^5 \text{ C}^{-2}\text{m}^2\text{N}$	Rabe et al. (2007)
$\beta$	$-2,92 \times 10^8 \text{ C}^{-2}\text{m}^2\text{N}$	Idem
$\zeta$	$1,56 \times 10^9 \text{ C}^{-6}\text{m}^{10}\text{N}$	Idem
$Q_{11}$	$0,089 \text{ C}^{-2}\text{m}^4$	Idem
$Q_{12}$	$-0,026 \text{ C}^{-2}\text{m}^4$	Idem
$s_{11}$	$-2,5 \text{ C}^{-12} \text{m}^2\text{N}^{-1}$	Idem
$s_{12}$	$9,0 \text{ C}^{-12} \text{m}^2\text{N}^{-1}$	Idem

Agrupando los términos de  $P^2$  en la Ecuación (4) se obtiene:

$$F_1 = -\frac{3}{2}(s_{11} + s_{12})\sigma^2 + \left\{ \frac{1}{2}\alpha + \epsilon^* \frac{td}{D^2} \left[ 1 - e^{-2\pi(\frac{D}{d})} \right] - (Q_{11} + 2Q_{12})\sigma \right\} P^2 + \frac{1}{4}\beta P^4 + \frac{1}{6}\zeta P^6 \quad (5)$$

Finalmente, a la anterior densidad de energía se le añade la contribución de la densidad de energía de pared de dominio,  $F_w$ , la cual depende del gradiente del campo de polarización que existe en la pared, y que representa físicamente la densidad volumétrica de energía en la dirección de mayor cambio de la polarización en el espacio, y puede expresarse así:

$$F_w = \frac{1}{2}g|\nabla P|^2 \quad (6)$$

donde  $g$  es el coeficiente de energía del gradiente de polarización que depende de la naturaleza del cristal.

De este modo, añadiendo a la energía dada en (5) la densidad de energía de la relación (6), se obtiene la densidad de energía del sistema en estudio:

$$F = -\frac{3}{2}(s_{11} + s_{12})\sigma^2 + \frac{1}{2}AP^2 + \frac{1}{4}\beta P^4 + \frac{1}{6}\zeta P^6 + \frac{1}{2}g|\nabla P|^2 \quad (7)$$

donde por facilidad de análisis se ha introducido el coeficiente

$$\frac{1}{2}A = \frac{1}{2}\alpha + \epsilon^* \frac{td}{D^2} \left[ 1 - e^{-2\pi(\frac{D}{d})} \right] - (Q_{11} + 2Q_{12})\sigma.$$

Además, si se limita el estudio al caso cuasi-unidimensional en el que la variación de la polarización ocurre tan solo en dirección perpendicular a la misma, y si se denomina como eje X a aquel de la dirección de cambio de la polarización, con el origen en el centro del dominio, entonces el gradiente de la polarización se reduce a  $\nabla P = \frac{dP}{dx}$ , y la densidad volumétrica de la energía libre del sistema resulta ser:

$$F = -\frac{3}{2}(s_{11} + s_{12})\sigma^2 + \frac{1}{2}AP^2 + \frac{1}{4}\beta P^4 + \frac{1}{6}\zeta P^6 + \frac{1}{2}g \left| \frac{dP}{dx} \right|^2 \quad (8)$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Los estados de equilibrio

Una vez determinada la densidad de energía libre del sistema, el equilibrio estático del mismo se puede obtener aplicando el método variacional a dicha densidad de energía, el cual se expresa por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial F}{\partial \left( \frac{dP}{dx} \right)} \right) - \frac{\partial F}{\partial P} = 0 \quad (9)$$

Se puede considerar que los dominios del sistema constituyen fases homogéneas, es decir, que dentro de cada uno de ellos no hay variación de las magnitudes físicas, por lo que la Ecuación (9) se reduce a  $\frac{\partial F}{\partial P} = 0$ , condición que aplicada a la Ecuación (8) equivale a:

$$AP + \beta P^3 + \zeta P^5 = 0 \quad (10)$$

cuyas soluciones proporcionan los valores de polarización de los estados de equilibrio de los dominios, los mismos que son:

$$P = 0$$

y

$$P_0 = \pm \left[ \frac{-\beta + (\beta^2 - 4A\zeta)^{\frac{1}{2}}}{2\zeta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

La solución  $P = 0$  corresponde a la fase cúbica paraeléctrica del sistema, y la solución (11) describe los dos estados de polarización de la fase ferroeléctrica tetragonal, es decir que la

polarización en tal fase está dada por  $\vec{P} = (0,0, \pm|P_0|)$ . La dirección de  $\vec{P}$  es perpendicular a la dirección X definida anteriormente. Son justamente estas dos posibilidades de orientación de la polarización, energéticamente equivalentes, las que dan lugar a la estructura de dominios de  $180^\circ$  y, por consiguiente, en la aparición de una pared de dominio entre dos de ellos.

La pared de dominio es una zona de transición entre los dos valores de la polarización  $\vec{P}$  dados por la Ecuación (11), y como tal es una región heterogénea del sistema. Por ello, el perfil de la polarización en la pared de dominio se puede obtener aplicando el principio variacional (9) a la densidad de energía libre dada por la Ecuación (8), lo cual conduce a la siguiente relación:

$$g \frac{d^2P}{dx^2} - AP - \beta P^3 - \zeta P^5 = 0 \quad (12)$$

Para la resolución de la Ecuación (12) dentro de la pared de dominio se ha realizado un procedimiento análogo a los realizados en los trabajos de Cao y Cross (1991) y de Falk (1983), involucrando el uso de integrales elípticas de tercera clase. Las condiciones de borde necesarias consisten en el hecho antes descrito de que la polarización a los costados de la pared toma los valores  $(0,0, \pm|P_0|)$ , las cuales además corresponden a la dirección [001]. Meyer y Vanderbilt (2002) y Torres Sancho (2009) reportan la existencia de paredes de dominio de  $180^\circ$  paralelas a esas mismas direcciones en el PT para su fase ferroeléctrica tetragonal. Con todo ello, se obtiene la solución siguiente:

$$P(x) = \frac{P_0 \sinh\left(\frac{x}{\xi_{180^\circ}}\right)}{\left[c + \sinh^2\left(\frac{x}{\xi_{180^\circ}}\right)\right]^{1/2}} \quad (13)$$

donde:

$$\xi_{180^\circ} = \frac{\sqrt{g}}{P_0(\zeta P_0^2 + \frac{1}{2}\beta)^{1/2}} \quad (14)$$

$$C = \frac{6\zeta P_0^2 + 3\beta}{4\zeta P_0^2 + 3\beta} \quad (15)$$

La Expresión (13), solución de la Ecuación (12), representa el perfil de la polarización a través de la pared de dominio en la fase ferroeléctrica tetragonal de la nanoesfera, mientras que la Ecuación (14) representa el espesor de la pared de dominio de  $180^\circ$ . Tanto el perfil como el espesor dependen de las condiciones en la que se encuentra la nanoesfera a través de las cantidades  $A$  y  $P_0$ , y es lo que se analiza a continuación.

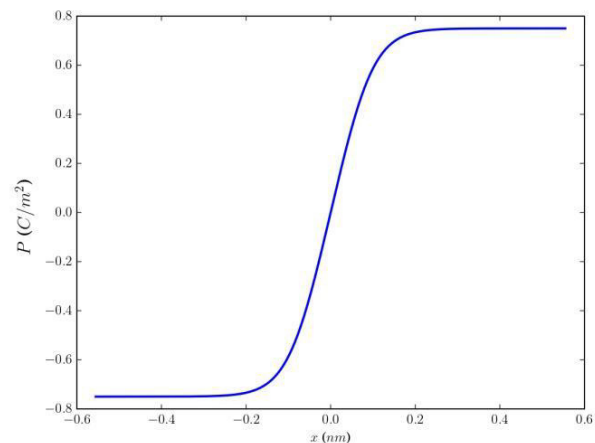
Para obtener resultados numéricos a partir de las soluciones antes encontradas es necesario conocer el valor del coeficiente  $g$  de energía de gradiente para el PT, además de hacer uso de los valores presentados en la Tabla 1. La literatura ofrece datos provenientes indirectamente de medidas experimentales, y otros provenientes de simulaciones para sistemas de PT próximos al que se estudia en este trabajo. En el trabajo de Li et al. (2001) se dan valores experimentales de coeficientes  $G_{ij}$  del gradiente de energía de pared de dominio, tales que para el sistema aquí en estudio, que es cuasi unidimensional, se tiene que  $g \equiv G_{11} = 0,6G_{110}$ , donde  $G_{110}$  es una constante para

normalizar  $G_{11}$  durante la simulación y se relaciona con el espaciado de la cuadrícula en el espacio real (Choudhury et al., 2005). Con base en medidas experimentales, Li et al. (2001) manifiestan que el valor de  $G_{110}$  está en el intervalo comprendido entre  $0,9 \times 10^{-10}$  y  $6,8 \times 10^{-10} \text{ C}^{-2}\text{m}^4\text{N}$ . Si bien Shin et al. (2007) mediante simulación en dinámica molecular han calculado coeficientes del gradiente de polarización con valores menores asociados a los planos (100), en el presente trabajo se ha decidido adoptar, en primer lugar, un valor experimental y, en segundo lugar, el valor menor del intervalo antes anotado, por cuanto este valor está relacionado con el estado de menor energía de pared de dominio y, por tanto, posiblemente el más probable; dicho valor es  $g = 0,6 \times 0,9 \times 10^{-10} \text{ C}^{-2}\text{m}^4\text{N} = 0,54 \times 10^{-10} \text{ C}^{-2}\text{m}^4\text{N}$  y es el que se ha utilizado en los cálculos que aquí se presentan.

No se han encontrado estudios experimentales que muestren el perfil de la pared de dominio de  $180^\circ$  del titanato de plomo en función de la temperatura, tamaño de partícula, y la capa de cargas eléctricas libres en su superficie; y tampoco la de grosor de pared de dominio en función de los parámetros ya mencionados a escala nanométrica. Por otro lado, existen trabajos como los de los autores Lee et al. (2009), Behera et al. (2011) y Pöykkö y Chadi (1999), donde mediante cálculos de primeros principios y de DFT se obtienen perfiles de la polarización en la pared de dominio del titanato de plomo para el cuerpo masivo, de modo que su escala en cuanto al grosor es de los amstrongs, lo cual no es compatible para realizar una comparación con el modelo aquí presentado que se refiere a una escala nanométrica.

### 3.2 Polarización en la pared de dominio $180^\circ$

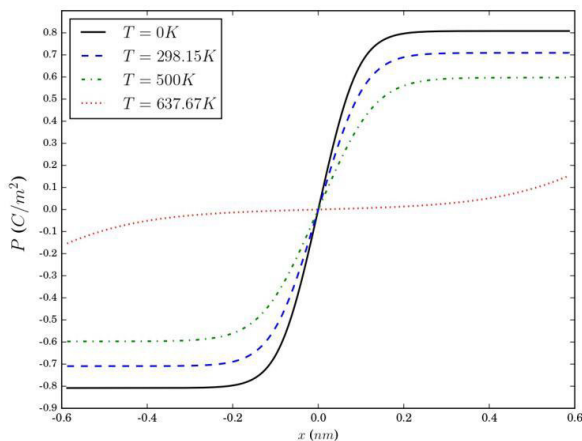
En la Figura 1 se presenta el perfil de polarización en función de la posición dentro de la pared de dominio de la nanoesfera de  $\text{PbTiO}_3$  para una polarización espontánea del cuerpo masivo igual a  $|P_0| = 0,75 \text{ C/m}^2$ , y obtenida a partir de la Ecuación (13). Allí se observa que la polarización cambia de signo cuando cruza el centro de la pared, como era de esperarse, y se satura en los valores  $P_0 = \pm 0,75 \text{ C/m}^2$ . La polarización sigue el comportamiento de una función simétrica alrededor del centro de la pared de dominio.



**Figura 1.** Polarización en función de la posición en la pared de dominio de  $180^\circ$ , para una polarización espontánea de cuerpo masivo  $P_0 = 0,75 \text{ C/m}^2$

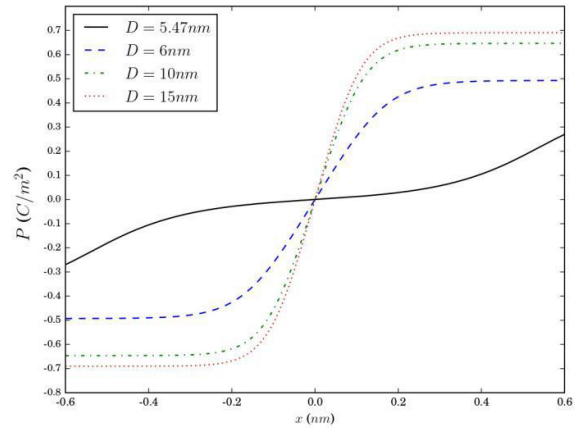
Los resultados que se muestran a continuación provienen de aplicar las Ecuaciones (13) ó (14) simultáneamente con la Ecuación (11). Esto se realiza por cuanto se quiere conocer el comportamiento de la polarización de la pared de dominio, o el grosor de pared de dominio, en función de parámetros tales como son la temperatura, el diámetro de la nanoesfera, el espesor de la capa de cargas espaciales que cubre a la nanoesfera de PT y los esfuerzos mecánicos, todos los cuales se encuentran implícitamente en la Ecuación (11).

En la Figura 2 se presenta el perfil de la polarización en función de la posición dentro de la pared de dominio  $180^\circ$  para varias temperaturas del sistema. Allí se observa que, en general, la polarización decrece notablemente cuando la temperatura se incrementa; a las temperaturas de 0 K, 298,15 K y 500 K los perfiles de polarización son semejantes entre sí, no así para la temperatura de 636,67 K donde el valor de la polarización experimenta una reducción notable y el comportamiento es muy distinto al que aparece para las temperaturas antes mencionadas. Esto es, al igual de lo que sucede con la polarización espontánea en los dominios ferroeléctricos, el valor de la polarización a través de la pared de dominio se reduce drásticamente cuando la temperatura del sistema se aproxima a la de su transición ferroeléctrica.



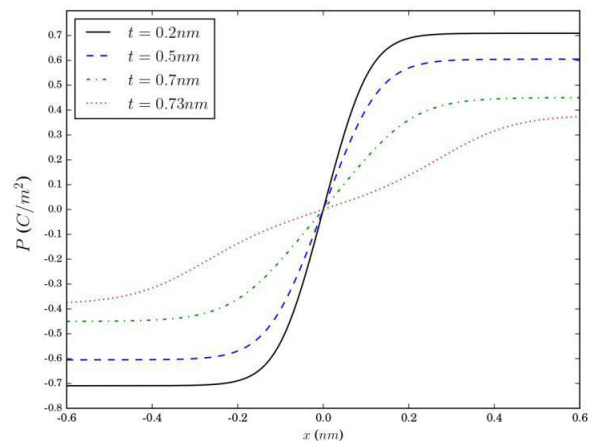
**Figura 2.** Polarización en función de la posición en la pared de dominio de  $180^\circ$  de una nanoesfera de diámetro 20 nm a diferentes temperaturas, con configuración de 3 dominios y capa de cargas libres de espesor  $t = 0,2$  nm

La Figura 3 presenta la polarización en función de la posición dentro de una pared de dominio  $180^\circ$  para una nanoesfera de PT con diferentes diámetros, un espesor fijo de la capa de cargas libres en su superficie y a temperatura ambiente. Se observa que, para todas las posiciones, al disminuir el tamaño de partícula también disminuye el valor de la polarización, y esta reducción es muy pronunciada para el valor de diámetro  $D = 5,47$  nm de la nanoesfera. Este valor de diámetro es el valor crítico calculado en el trabajo de Andrade y Lascano (2017) para la nanopartícula de PT, diámetro para el cual la polarización espontánea prácticamente se anula.



**Figura 3.** Polarización en función de la posición en la pared de dominio de  $180^\circ$ , para varios diámetros de la nanoesfera, con configuración de 3 dominios, capa de cargas libres de espesor  $t = 0,2$  nm y a temperatura ambiente  $T = 298,15$  K

En la Figura 4 se presenta el perfil de la polarización en función de la posición dentro de una pared de dominio de  $180^\circ$  en una nanoesfera de PT de 20 nm de diámetro y a temperatura ambiente, para diferentes espesores de la capa superficial de cargas libres. El aumento del grosor de la película de cargas libres sobre la superficie de la nanopartícula reduce, para todas las posiciones, el valor de la polarización en la pared de dominio. Particularmente, para el valor de  $t = 0,73$  nm, hay una gran distorsión del perfil de la polarización respecto al perfil que se observa para el espesor  $t = 0,20$  nm, lo cual expresa la fuerte influencia de la capa de cargas libres sobre el campo de despolarización dentro de la pared de dominio.



**Figura 4.** Polarización en función de la posición en pared de dominio de  $180^\circ$  de una nanoesfera de diámetro  $D = 20$  nm, para varios grosores de capa de cargas libres superficiales, con configuración de 3 dominios y a temperatura ambiente  $T = 298,15$  K

La Figura 5 presenta la polarización en función de la posición en una pared de dominio  $180^\circ$  para una nanoesfera de PT con 100 nm de diámetro y a 50 K de temperatura, para diferentes valores de esfuerzos mecánicos aplicados sobre la misma. Se observa que los esfuerzos de tensión (esfuerzos positivos) hacen que el perfil de polarización aumente ligeramente en relación con el perfil de polarización en ausencia de esfuerzos (línea negra). En contraste, bajo la presencia de esfuerzos de compresión (esfuerzos negativos) el perfil de polarización en la pared de dominio se reduce significativamente respecto al

caso de la nanoesfera libre de esfuerzos; tal reducción es mayor a medida que los esfuerzos de compresión aumentan, y podría suceder que para valores elevados de esfuerzos de compresión se altere la estabilidad ferroeléctrica del sistema. Puede sugerirse que, a escala nanométrica, la aplicación de esfuerzos de compresión elevados provoca una reducción del tamaño de la nanoesfera ferroeléctrica, y con ello una amplificación del efecto de tamaño de partícula ya observado en el trabajo de Andrade y Lascano (2017).

### 3.3 Espesor de pared de dominio de 180°

En la Figura 6 se representa el espesor de la pared de dominio en función de la polarización espontánea de la nanoesfera de PT. Allí se observa que el espesor de pared de dominio se incrementa de manera abrupta cuando la polarización espontánea se acerca su valor crítico dado por  $P(T = T_C^-) = \sqrt{-\frac{\beta}{2\zeta}} = 3,053 \times 10^{-1} \text{ C/m}^2$  y calculado en el trabajo de Andrade y Lascano (2017) para la nanoesfera de titanato de plomo. Aparece así un resultado peculiar: un crecimiento brusco del espesor de la pared de dominio cuando la partícula se acerca a la transición ferroeléctrica. Una posible interpretación es que este acelerado crecimiento del grosor de pared de dominio hace que la pared de dominio vaya ocupando más volumen dentro de la nanoesfera hasta cubrir todo el cristal, cuando éste se acerca a la transición ferroeléctrica. Por otro lado, para valores de polarización superiores al crítico  $P(T = T_C^+) = \sqrt{-\frac{\beta}{2\zeta}} = 3,053 \times 10^{-1} \text{ C/m}^2$ , el grosor de pared de dominio se reduce notablemente y tiende a cero.

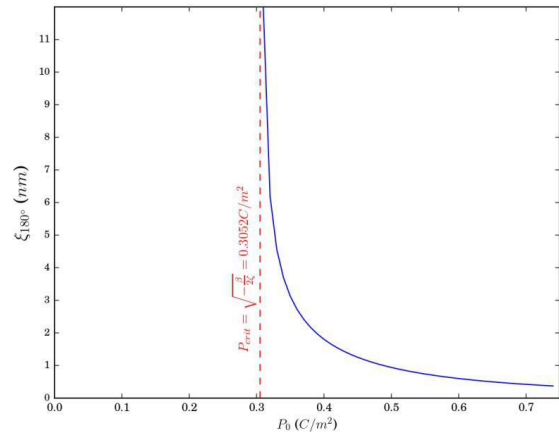


Figura 6. Espesor de la pared de dominio en función de la polarización espontánea de una nanoesfera de titanato de plomo

La Figura 7 presenta el espesor de la pared de dominio de una nanoesfera de PT en función de la temperatura y para diferentes diámetros de la nanopartícula. Se observa que, para un diámetro definido, el espesor crece con el aumento de la temperatura y lo hace de manera muy abrupta cuando la temperatura se acerca a cierto valor, el cual es diferente para cada diámetro de la partícula. Tal temperatura es la de Curie de la transición ferroeléctrica calculada en el trabajo de Andrade y Lascano (2017), y se ve que la misma se reduce con la disminución del tamaño de partícula, lo cual concuerda con el análisis que se realiza en el trabajo mencionado. Además, se observa que a 0 K de temperatura y para todos los diámetros de la partícula, el grosor de la pared de dominio es cercano a los 0,3 nm.

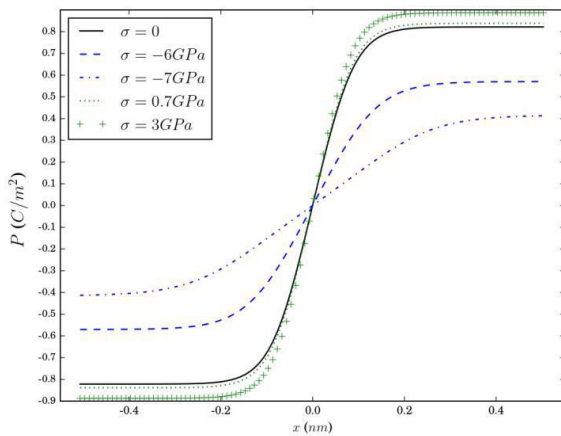


Figura 5. Polarización en función de la posición en pared de dominio 180° para diferentes esfuerzos mecánicos aplicados a una nanoesfera de PT con diámetro  $D = 100 \text{ nm}$ , con capa de cargas superficiales de grosor  $t = 0,2 \text{ nm}$ , con configuración de 3 dominios y a la temperatura  $T = 50 \text{ K}$

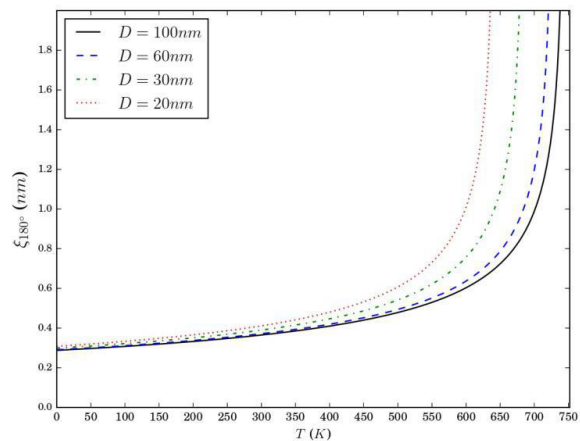
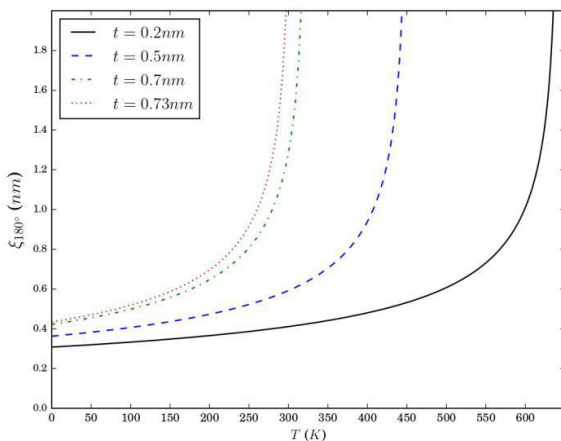


Figura 7. Espesor de la pared de dominio de nanoesfera de titanato de plomo en función de la temperatura, para diferentes diámetros de la nanoesfera, con capa de cargas superficiales de grosor de  $t = 0,2 \text{ nm}$  y con configuración de 3 dominios

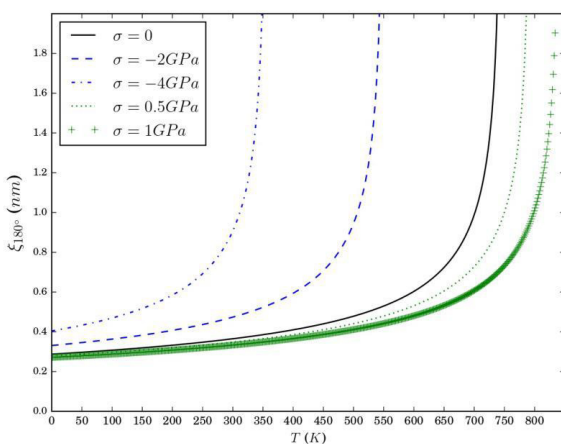
En la Figura 8 se presenta el espesor de la pared de dominio en función de la temperatura de la nanoesfera de PT con 20 nm de diámetro y configuración de 3 dominios, para distintos valores del espesor de la capa superficial de cargas libres. Como era de esperarse, se observa el mismo aumento brusco del espesor cuando crece la temperatura; el valor de temperatura para el cual el incremento es súbito es aquel de la transición ferroeléctrica; tal valor se reduce de manera notable

con el aumento del espesor de la capa de cargas libres superficiales, reduciéndose así la estabilidad de la fase ferroeléctrica. Además, a la temperatura de 0 K, el valor del grosor de la pared crece con el aumento del espesor de la capa de cargas superficiales.

La Figura 9 muestra el espesor de la pared de dominio en función de la temperatura de una nanoesfera de PT con 100 nm de diámetro y para diferentes esfuerzos aplicados. Se han considerado 3 dominios en la nanoesfera y una capa de cargas libres superficiales con 0,2 nm de espesor. En general, se observa el mismo comportamiento de los dos casos anteriores en relación con el aumento de la temperatura. Y además se observa que los esfuerzos de tensión aplicados provocan un incremento de la temperatura de transición ferroeléctrica y, por el contrario, los esfuerzos de compresión reducen tal temperatura. Por otro lado, para la temperatura de 0 K el valor del grosor de pared de dominio crece con el aumento de la magnitud de los esfuerzos de compresión, y prácticamente no se altera con los esfuerzos de tensión.



**Figura 8.** Espesor de la pared de dominio en función de la temperatura de nanoesfera de titanato de plomo con diámetro  $D = 20$  nm y configuración de 3 dominios, para diferentes grosores  $t$  de la capa de cargas superficiales



**Figura 9.** Espesor de la pared de dominio en función de la temperatura de nanoesfera de titanato de plomo de diámetro  $D = 100$  nm, para diferentes esfuerzos mecánicos  $\sigma$  aplicados a la nanoesfera, con configuración de 3 dominios y capa de cargas superficiales de espesor  $t = 0,2$  nm

#### 4. CONCLUSIONES

El presente modelo prevé que el perfil de la polarización de pared de dominio de  $180^\circ$  de la nanoesfera de titanato de plomo tiende a desaparecer y a deformarse con el aumento de la temperatura, con la reducción del tamaño de la nanopartícula, con el aumento del grosor de la capa de cargas espaciales en la superficie de la misma, y con la aplicación de esfuerzos de compresión. Por el contrario, la estabilidad del carácter ferroeléctrico del sistema se ve favorecido con la presencia de esfuerzos de tensión y con el incremento del tamaño de partícula.

Al aumentar la temperatura y al aproximarse a la temperatura de transición ferroeléctrica (la cual depende del diámetro de la nanoesfera, del espesor de la capa de cargas espaciales y de la presencia de esfuerzos), el espesor de la pared de dominio de la nanoesfera de titanato de plomo crece de forma abrupta. La pared de dominio es una zona heterogénea de polarización y si su espesor crece súbitamente (tal que el espesor podría ocupar toda la nanoesfera) significa que la fase ferroeléctrica está tornándose inestable; además, simultáneamente la polarización misma en la pared va disminuyendo y tiende a desaparecer. Estos dos aspectos pertenecen pues al mismo fenómeno: el cristal está transitando de la fase ferroeléctrica a la paraeléctrica.

Los resultados aquí encontrados muestran principalmente cómo la temperatura de transición ferroeléctrica de una nanoestructura puede ser sintonizable controlando parámetros tales como: tamaño de la nanoestructura, presencia de cargas espaciales, y aplicación de esfuerzos de tensión y/o compresión.

#### REFERENCIAS

- Andrade, J. y Lascano, L. (2017). Comportamiento ferroeléctrico de una nanoesfera de titanato de plomo debido a campos de despolarización y a esfuerzos mecánicos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 56 (1), 19–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bseccv.2016.07.001>
- Behera, R.K., Lee, C.-W., Lee, D., Morozovska, A.N., Sinnott, S.B., Asthagiri, A., Gopalan, V. y Phillpot, S.R. (2011). Structure and energetics of  $180^\circ$  domain walls in  $\text{PbTiO}_3$  by density functional theory. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 23(17), 175902. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/23/17/175902>
- Bell, A.J., Shepley, P.M., y Li, Y. (2020). Domain Wall Contributions to Piezoelectricity in Relaxor-Lead Titanate Single Crystals. *Acta Materialia*, 195, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.034>
- Cao, W. y Cross, L.E. (1991). Theory of tetragonal twin structures in ferroelectric perovskites with a first-order phase transition. *Phys. Rev. B*, 44(1), 5–12. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.5>

- Catalan, G., Seidel, J., Ramesh, R., y Scott, J.F. (2012). Domain wall nanoelectronics. *Reviews of Modern Physics*, 84(1), 119-156. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.84.119>
- Chai, X., Jiang, J., Zhang, Q., Hou, X., Meng, F., Wang, J., Gu, L., Zhang D.W. y Jiang, A.Q. (2020). Nonvolatile ferroelectric field-effect transistors. *Nature Communications*, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16623-9>
- Chopra, H.D., Ji, C. y Kokorin, V.V. (2000). Magnetic-field-induced twin boundary motion in magnetic shape-memory alloys. *Phys. Rev. B*, 61(22), R14913. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.R14913>
- Choudhury, S., Li, Y., y Chen, L-Q. (2005). A phase diagram for epitaxial  $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  thin films at the bulk morphotropic boundary composition. *J. Am. Ceram. Soc.*, 88(6), 1669 – 1672. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00319.x>
- Falk, F. (1983). Ginzburg-Landau theory of static domain walls in shape-memory alloys. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 51(2), 177–185. <https://doi.org/10.1007/BF01308772>
- Faraji, N., Yan, Z., y Seidel, J. (2017). Electrical conduction at domain walls in lead titanate ( $\text{PbTiO}_3$ ) single crystals. *Applied Physics Letters*, 110(21), 213108. <https://doi.org/10.1063/1.4983642>
- Foerster, M., Boule, O., Esefelder, S., Mattheis, R., Kläui M. (2016). Domain Wall Memory Device. In: Xu Y., Awschalom D., Nitta J. (eds) *Handbook of Spintronics*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6892-5\\_48](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6892-5_48)
- Grimley, E.D., Schenk, T., Mikolajick, T., Schroeder, U. y LeBeau, J.M. (2018). Atomic structure of domain and interphase boundaries in ferroelectric  $\text{HfO}_2$ . *Advances Materials Interfaces*, 5(5), 1701258. <https://doi.org/10.1002/admi.201701258>
- Jiang, J., Bai, Z. L., Chen, Z.H., He, L., Zhang, D.W., Zhang, Q.H., Shi, J.A, Park, M.H., Scott, J.F., Hwang C.S. y Jiang, A. Q. (2018). Temporary formation of highly conducting domain walls for non-destructive read-out of ferroelectric domain-wall resistance switching memories. *Nature materials*, 17(1), 49-56. <https://doi.org/10.1038/nmat5028>
- Kumar, A., Guy, J.G., Zhang, L., Chen, J., Gregg, J.M. y Scott, J.F. (2020). Nanodomain patterns in ultra-tetragonal lead titanate ( $\text{PbTiO}_3$ ). *Applied Physics Letters*, 116(18), 182903. <https://doi.org/10.1063/5.0007148>
- Lallart, M. (Ed). (2011). *Ferroelectrics – Applications*. Rijeka, Croatia: Intech Open.
- Lee, D., Behera, R.K., Wu, P., Xu, H., Li, Y.L., Sinnott, S.B., Phillipot, S.R., Chen, L.Q. y Gopalan, V. (2009). Mixed Bloch-Néel-Ising character of  $180^\circ$  ferroelectric domain walls. *Phys. Rev. B*, (80), 060102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.060102>
- Li, J., Rogan, R., Üstündag, E. y Bhattacharya, K. (2005). Domain switching in polycrystalline ferroelectric ceramics. *Nature Materials*. 4 (10), 776–781. <https://doi.org/10.1038/nmat1485>
- Li, Y.L., Hu, S., Liu, Z.K., y Chen, L.Q. (2001). Phase-field model of domain structures in ferroelectric thin films. *Applied Physics Letters*, 78(24), 3878–3880. <https://doi.org/10.1063/1.1377855>
- Li, Y.L. y Chen, L.Q. (2006). Temperature-strain phase diagram for  $\text{BaTiO}_3$  thin films. *Applied physics letters*, 88(7), 072905. <https://doi.org/10.1063/1.2172744>
- Lipatov, A., Li, T., Vorobeva, N.S., Sinitiskii, A. y Gruverman, A. (2019). Nanodomain engineering for programmable ferroelectric devices. *Nano Letters*, 19(5), 3194-3198. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00673>
- Meyer, B. y Vanderbilt, D. (2002). Ab initio study of ferroelectric domain walls in  $\text{PbTiO}_3$ . *Phys. Rev. B*, 65(10) 104111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.104111>
- Pöykkö, S. y Chadi, D.J. (1999). Ab initio study of  $180^\circ$  domain wall energy and structure in  $\text{PbTiO}_3$ . *Applied Physics Letters*, 75(18), 2830–2832. <https://doi.org/10.1063/1.125164>
- Prando, G. (2017). Walls and memory. *Nature Nanotech*, 12, 724. <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.166>
- Rabe, K.M., Ahn, C.H., y Triscone, J.M. (Eds), (2007). *Physics of ferroelectrics: A modern perspective*. Heidelberg, Germany, Springer, 368.
- Rojac, T. y Damjanovic, D. (2017). Domain walls and defects in ferroelectric materials. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(10S), 10PA01. <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.10PA01>
- Salje, E.K. (2010). Multiferroic domain boundaries as active memory devices: Trajectories towards domain boundary engineering. *Chemphyschem: European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, 11(5), 940-950. <https://doi.org/10.1002/cphc.200900943>
- Scott, J.F., Evans, D.M., Gregg, J.M. y Gruverman, A. (2016). Hydrodynamics of domain walls in ferroelectrics and multiferroics: Impact on memory devices. *Applied Physics Letters*, 109(4), 042901. <https://doi.org/10.1063/1.4959996>



- Shin, Y.-H., Grinberg, I., Chen I.-W., y Rappe, A.M. (2007). Nucleation and growth mechanism of ferroelectric domain-wall motion. *Nature*, 449, 881–884. <https://doi.org/10.1038/nature06165>
- Sun, T., Wang, X., Wang, H., Zhang, X., Cheng, Z., Sun, C. y Li, L. (2010). A phenomenological model on phase transitions in nanocrystalline barium titanate ceramic. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(9), 2571 – 2573. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03900.x>
- Torres Sancho, M. (2009). Study of ferroelectric PbTiO<sub>3</sub> nanostructures deposited onto substrates and prepared by a novel microemulsion mediated synthesis. (PhD thesis), Instituto de Química y Materiales “Alvaro Alonso Barba” (Universidad Carlos III de Madrid), Madrid.
- Wada, S., Muraishi, T., Yokoh, K., Yako, K., Kamemoto, H. y Tsurumi, T. (2007). Domain wall engineering in lead-free piezoelectric crystals. *Ferroelectrics*, 355(1), 37-49. <https://doi.org/10.1080/00150190701515881>
- Zhang, S., Li, H., y Li, M. (2008). Size-dependent piezoelectric coefficient  $d_{33}$  of PbTiO<sub>3</sub> nanoparticles. *Materials Letters*. 62(16), 2438-2440. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.015>

## BIOGRAFÍAS



**Julio César Andrade Landeta.** Nació en Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador en 1987. Físico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, 2014. Su área de investigación es la de transiciones de fase en cristales ferroeléctricos. En la actualidad se encuentra realizando sus estudios de Posgrado en la Maestría de Física de la Universidad San Francisco de Quito. <https://orcid.org/0000-0003-0176-1373>



**Luis Rodrigo Lascano Lascano.** Doctorado en Física de Materiales, Universidad Autónoma de Madrid e Instituto de Cerámica y Vidrio, España. Físico, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito. Profesor Principal del Departamento de Física de la EPN. Miembro del Grupo de Investigación de Materiales Electrónicos y Magnéticos de dicho departamento. Las líneas de investigación que desarrolla son: Estudios teórico y experimental de Materiales Electrocerámicos Ferroeléctricos, y estudios teóricos en Óptica no lineal. ORCID: 0000-0001-7588-0194.



# Determinantes de la Adopción de Innovación en Ecuador

Pilamunga-Shaca, Danny<sup>1,2</sup> ; Guevara-Rosero, Grace<sup>3,\*</sup> 

<sup>1</sup>Ingeniería en Ciencias Económicas y Financieras, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Cooperativa de Ahorro y Crédito Mushuc Runa, Ecuador

<sup>3</sup>Departamento de Economía Cuantitativa, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

**Resumen:** Utilizando un modelo de estimación de elección binaria de 2 etapas, se determinan los factores que motivan a las empresas a adoptar innovaciones previamente desarrolladas en productos y procesos. Se utilizó una muestra de 8 025 empresas ecuatorianas provenientes de la Encuesta de Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación, en sus ediciones 2009-2011 y 2012-2014. Los resultados concluyen que el recurso cognitivo de las empresas, las actitudes colaborativas con clientes y proveedores y los canales de comunicación que estas tienen influyen positivamente en la adopción de innovación. El tamaño de la empresa resultó tener una relación en forma de U, mientras que el nivel de exportaciones resultó no tener ningún efecto.

**Palabras clave:** Adopción, Innovación, Difusión, Conocimiento, Productos, Procesos.

## Determinants of the Adoption of Innovation in Ecuador

**Abstract:** Using a 2-stage binary choice estimation, the factors that motivate firms to adopt previously developed innovations in products and processes are determined. A database of 8 025 Ecuadorian firms from the National Survey of Science, Technology and Innovation Activities, in its 2009-2011 and 2012-2014 editions, is used. The results show that the firm's cognitive resource, collaborative attitudes with customers and suppliers and the communication channels have a positive impact on the adoption of innovation. The size of the firm has a U-shaped relation with the adoption of innovation while the level of exports does not have any effect.

**Keywords:** Adoption, Innovation, Diffusion, Knowledge, Products, Processes.

### 1. INTRODUCCIÓN

La innovación es uno de los componentes más importantes para el desarrollo económico, productividad y avance tecnológico de cualquier nación (Nadiri, 1993). Mediante la innovación realizada por las empresas se obtiene mayor crecimiento económico y se pueden generar mayores ventajas competitivas a largo plazo (Fagerberg, 1988). Un retraso o un estancamiento en la innovación comprometen seriamente el desempeño y la supervivencia de una economía. (Porter, 1990). La innovación en una empresa se puede lograr a través de dos vías: La primera es una innovación propia, desarrollada internamente por la misma entidad que la utiliza. La segunda opción es la adopción, que es realizada principalmente por otras entidades y adquirida posteriormente por otra empresa que hará uso de la misma (Autant-Bernard et al., 2010).

El comportamiento de adopción suele ser muy usual en países en vías de desarrollo, donde las interacciones entre clientes y empresas se ven mermadas por el bajo grado institucional, lo que hace que no existan incentivos

suficientes para innovar en base al esfuerzo propio (Chaminade & Vang, 2008). Con un análisis de costos y beneficios, algunas empresas pueden encontrar más factible adoptar una idea materializada por otros en lugar de desarrollar su propia innovación (Benhabib & Spiegel, 2005; Nelson, 1959).

Cuando se utilizan muy frecuentemente tecnologías e ideas desarrolladas por entidades externas podría estancar el potencial innovador de las firmas nacionales, incrementando la competitividad externa y extranjera (Benhabib & Spiegel, 2005; Liu et al., 2013; Nelson, 1959). Esto hace que las economías en vías de desarrollo se vuelvan progresivamente más dependientes de las economías más desarrolladas (Hobday, 2005; Jameson, 2016). Según el reporte *The Global Innovation Index* (2019) realizado por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, la Universidad de Cornell y la Escuela de Negocios INSEAD, Ecuador ha ocupado consecutivamente los últimos lugares entre los países menos innovadores a nivel mundial y regional, llegando incluso a posicionarse como el sexto país menos innovador del mundo en el año 2010. De acuerdo con la Encuesta de Actividades de

\*carolina.guevara@epn.edu.ec

Recibido: 01/11/2019

Aceptado: 22/09/2020

Publicado: 30/11/2020

10.33333/rp.vol46n2.05

CC BY 4.0

Ciencia, Tecnología e Innovación (2015), entre el año 2009 a 2014, de las 8 025 empresas ecuatorianas encuestadas, 4 066 introdujeron una innovación o mejora significativa de bienes, servicios o procesos, que representan el 42,07%. De las empresas que innovaron, 1 339 empresas (32%) lo hicieron a través de la adopción.

El objetivo de esta investigación es analizar los determinantes de la adopción de la innovación. Para ello, se emplea la metodología Heckman-Probit que permite corregir el sesgo de selección. Este problema de sesgo consiste en que solo aquellas empresas que obtienen una innovación pueden elegir entre adopción o desarrollo propio. Esto implica que aquellas empresas que no hayan tenido alguna innovación no serían consideradas. Los datos usados pertenecen a la Encuesta de Actividades de Innovación, Ciencia y Tecnología en sus dos únicas ediciones existentes, 2009-2011 y 2012-2014.

Los resultados muestran que los canales de comunicación e intercambio creados por las empresas a través de la innovación organizacional, grupos empresariales y actividades de cooperación promueven el proceso de difusión de innovaciones, por lo cual las empresas ecuatorianas son capaces de reconocer innovaciones para posteriormente adoptarlas. El talento humano bien preparado también influye positivamente en el proceso de adopción de innovaciones, debido al efecto del intercambio y absorción de conocimiento. La participación en mercados internacionales a través de exportaciones aparenta no ser relevante.

Esta investigación contribuye a la literatura poco explorada sobre la innovación y adopción de innovaciones en vía de desarrollo, como es el caso de Ecuador, identificando la medida en la que ciertos factores inciden sobre la adopción de innovación. Además, en base a los resultados de este estudio, se proponen recomendaciones dirigidas a las entidades que tienen influencia en los procesos de innovación tanto en el ámbito público como privado.

La estructura de este estudio contempla varias secciones. En la sección 2 se realiza una exploración teórica que identifica los factores que determinan la innovación y la adopción de innovación. En la sección 3, se describen los datos y la metodología empleada. La sección 4 discute los resultados obtenidos y finalmente la sección 5 concluye y propone recomendaciones.

## 2. LITERATURA RELACIONADA

El proceso de adopción de innovación se puede entender a través de la teoría de la difusión de innovaciones (E. Rogers, 1962) y la teoría de la absorción de conocimiento (M. Cohen & Levinthal, 1990). Rogers (1962) afirma que las innovaciones podrían generar cierta incertidumbre antes de ser lanzadas al mercado. Así, solo una minoría de empresas deciden asimilar dicho riesgo y las empresas que no tienen la capacidad de asimilar la incertidumbre pasan a ser adoptantes. El beneficio que reciban de dicha innovación decrecerá con el tiempo hasta que la innovación naturalmente pierda su valor. La segunda teoría de absorción de conocimiento muestra que la propensión a adoptar innovaciones depende de la capacidad

de las firmas de asimilar y absorber conocimientos adquiridos a través del aprendizaje. A su vez, el nivel de absorción de conocimiento dependerá en gran medida del personal altamente cualificado, la estructura organizacional, estructuras de comunicación y los flujos internos de información.

Como la innovación es un factor clave para el desarrollo de los países, el estudio para países en vías de desarrollo es pertinente y relevante. Según Hobday (2005), los países en vías de desarrollo adquieren innovaciones en un tiempo tardío, influenciados principalmente por el status o liderazgo de aquellos países con mayor industrialización Kim (1997) enuncia que los países en desarrollo inicialmente adoptan tecnología externa, la asimilan después de un tiempo para posteriormente mejorarla. Este proceso es conocido como proceso de recuperación.

La adopción de innovación tiene fundamentos teóricos relacionados con el conocimiento, el aprendizaje de la empresa, los canales de intercambio y comunicación, actividades cooperativas y otras características internas. Los mecanismos de relación con cada tipo de variable se presentan a continuación.

### 2.1 Nivel de Personal Altamente Cualificado

Las empresas con mayor capital humano para innovar tendrían una mayor disposición a realizar una innovación propia respecto a tomar innovaciones desarrolladas por otros (Arundel, 2007). Sin embargo, Arrow (1962), Benhabib y Spiegel (2005), Mansfield, Schartz y Wagner (1981) y Nelson (1959) manifiestan que imitar ideas pre-existentes tiende a ser menos costoso para las empresas, a pesar de tener un elevado recurso intelectual a su disposición. Cohen y Levinthal (1990), a través de su conceptualización de capacidad de absorción de conocimiento, sugieren que aquellas entidades que cuentan con talento humano mejor preparado tienen una mayor capacidad de adquirir conocimientos externos que se tienden a explotar en la imitación de nuevos productos o procesos. Dicha capacidad de absorción depende en gran medida del nivel de conocimientos previos que posee la empresa (Jovanovic & Rob, 1989) Nelson y Phelps (1965) argumentan que aquellos individuos con un nivel educativo más alto tienden a adoptar en mayor grado las innovaciones más productivas que aquellos con menor nivel de educación. Así, la capacidad para utilizar los resultados de los esfuerzos de investigación realizados por otras empresas o establecimientos depende de la capacidad para comprenderlos y evaluar su potencial económico. Autant-Bernard et al. (2010) deducen que las empresas con personal altamente cualificado deberían ser capaces de crear sus propias innovaciones y encuentran una relación negativa con la adopción de innovaciones.

### 2.2 Innovación Organizacional

Autores como Drucker (1985), Schumpeter (1934) y Hagerdorn (2002) sugieren que la innovación es resultado de la condensación de varios logros organizacionales que buscan responder a las necesidades del mercado y a la adaptación al progreso tecnológico. Así, las mejoras desarrolladas por la empresa en su sistema organizacional traen como

consecuencia un aumento significativo de la innovación en productos y procesos (Naranjo-Valencia et al., 2012). Esto sucede puesto que las innovaciones en la organización de la empresa funcionan como mejoras hacia los canales de comunicación por las que la innovación se transmite dentro de un sistema social<sup>2</sup> (Autant-Bernard et al., 2012; Lane & Lubatkin, 1998; Lenox & King, 2004). Para Veugelers (1996) y Naranjo-Valencia et al. (2012), la influencia que tenga la estructura organizacional en la decisión de desarrollar innovaciones propias o solo adoptarlas dependerá de la capacidad de absorción de conocimiento de la firma, como consideraban M. Cohen y Levinthal (1990).

### 2.3 Financiamento Público

El soporte a través de entidades de fondos públicos parece ser efectiva para mejorar el desempeño innovador de las empresas, pues otorga apoyo a través de subvenciones, subsidios, préstamos de la banca pública con tasas de interés preferencial, exoneración de impuestos y aranceles bajos (Huelgo & Moreno, 2015). Según Autant-Bernard et al. (2010), la financiación pública de la innovación es más eficiente para fomentar la adopción que para generar la innovación en sí. Esto podría deberse a que el tipo de instrumentos financieros utilizados (subvenciones, subsidios, préstamos) hacen que, a largo plazo, las firmas generen comportamientos dependientes de otras innovaciones a pesar de tener el incentivo suficiente para desarrollar ideas por sí mismas. Esto podría también depender de la magnitud del incentivo otorgado por la banca pública, según explican Autant-Bernard et al. (2010).

Spielkamp y Rammer (2009) señalan que algunos proyectos de carácter innovador pueden resultar desfavorables para la empresa al final si se comparan las ganancias que se obtendrán contra sus costos de implementación, lo cual según B.H. Hall y Lerner (2010) representa un monto demasiado elevado para que se realice con recursos propios.

### 2.4 Características Sectoriales

La actividad principal de la empresa en el mercado determina gran parte de su comportamiento innovador (Kenessey, 1987; Landau & Rosenberg, 1986). Los procesos de innovación requieren de fuentes de conocimiento que se desarrolla interna o externamente (M. Cohen & Levinthal, 1990). Autores como Freeman (1988), Lamberton (1986) y Hollander (2007) concluyen que las iniciativas de desarrollo de innovaciones provienen de personal con conocimientos científicos, de diseño y de ingeniería. El aprendizaje acumulado de ciertos sectores permite mejorar las condiciones para desarrollar una innovación (M. Cohen & Levinthal, 1990). Aquellas firmas de sectores de Alta Intensidad de Conocimiento<sup>3</sup> poseen el talento necesario para innovar por su cuenta (Lane & Lubatkin, 1998). Esto se debería a que las actividades de dichas empresas se basan de por sí en el desarrollo de nuevas tecnologías y de

nuevas ideas (Metcalfé & Miles, 2000) acorde a las necesidades de sus clientes y proveedores (Savic et al., 2014).

Apriorísticamente, aquellas firmas con un alto nivel de conocimiento tendrían la capacidad de desarrollar internamente sus propias ideas (Raspe, 2009). No obstante, estas firmas también disponen de una capacidad de absorción de conocimiento externo, que permite que el aprendizaje se asimile con relativa facilidad (M. Cohen & Levinthal, 1990). Por tanto, acoplar una innovación externa y explotarla en el mercado también puede ser una opción viable (E. Rogers, 1962).

La literatura sugiere que la tecnología es un aspecto sobresaliente de las actividades de la empresa cuando se trata de innovación y crecimiento económico (Acs & Armington, 2004; Fagerberg, 1988; Hausmann & Rodrik, 2003). Para Jaffe (1986), las firmas que destinan sus recursos al desarrollo tecnológico tienen mayor facilidad para lograr una innovación. Balcerowicz, P. Keczowski y W. Katek-Rubiak (2009) sostienen que los sectores con un alto componente tecnológico son el motor de crecimiento económico del país, ya que las actividades de I+D que se generan en estos sectores son las principales fuentes de innovación tecnológica. En síntesis, aquellas industrias de Alta Intensidad Tecnológica<sup>4</sup> tendrían una alta probabilidad de lograr una innovación.

### 2.5 Exportaciones

Las empresas más productivas se abren caminos a mercados internacionales para mejorar los retornos de sus inversiones, aumentar su productividad y disminuir sus costos de producción (Lileeva & Trefler, 2010). Las empresas que más destacan en su productividad e innovación serían las primeras en abrirse a mercados internacionales y comenzar a exportar (Yeaple et al., 2004). Las exportaciones funcionan como un mecanismo de aprendizaje e intercambio que permiten a las firmas locales acceder a tecnologías exteriores de última gama que posteriormente se aplican en el mercado local, lo que fomenta las actividades innovadoras locales (Albis Salas, 2015). Rogers (1962) explica a través de su teoría de la difusión de innovaciones que durante el comercio exterior existen un intercambio de activos tangibles e intangibles. Según Coe, Helpman y Hoffmaister (2009), un efecto secundario de dicho intercambio es la imitación de innovaciones. La continua interacción de las empresas exportadoras con otros países les permite acceder a nuevas tecnologías con gran eficiencia (Nobel & Birkinshaw, 1998). Así, existe una relación positiva entre el comercio exterior y la difusión de innovaciones (Fagerberg & Verspagen, 2002; Keller, 1997).

Respecto al intercambio de activos intangibles, a saber, ideas y conocimientos, Lucas (1989) y Autant-Bernard et al. (2010) explican que las interacciones interpersonales producidas durante el comercio exterior se relacionan directamente con la

<sup>2</sup> El sistema social se entiende como un conjunto de individuos interrelacionados, una innovación puede ser difundida en ella si es aceptada por las firmas líderes con mayor relevancia en el mercado.

<sup>3</sup> El sector de Alta Intensidad en Conocimiento está agrupado de acuerdo a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) a 2 dígitos comprende las industrias con los siguientes códigos: Q86, Q87, Q88, M69,

M70, M71, M72, M73, M74, M75, K64, K65, K66, C33, E36, E39, H50, H51, J58, J59, J60, J61, J62, J63.

<sup>4</sup> El sector de Alta Intensidad Tecnológica está agrupado de acuerdo a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) a 2 dígitos y abarca las industrias con los siguientes códigos: C20, C21, C26, C27, C28, C29, C30, C32.

capacidad de absorción de conocimiento y la difusión de innovaciones. Albis y Salas (2015) y Iammarino et al. (2007) explican que la interacción y canales de comunicación creados a través del comercio pueden hacer que las empresas se limiten a aprovechar las innovaciones logradas por otras empresas más grandes. Esto es explicado por Narula y Zanfei (2003) como un efecto natural de la globalización.

Autant-Bernard et al. (2010) encuentran que el nivel de comercio exterior tiene una relación negativa con la adopción de innovaciones. Explican que esta relación era inesperada desde un principio, aunque argumentan que esto podría indicar que el efecto de incrementar la competitividad debido a la presión del comercio internacional es superior al efecto de incrementar la difusión de innovaciones. El incremento de la competitividad debido a la interacción en el comercio internacional se debe a que las firmas nacionales tienen mayor presión por incrementar su productividad, minimizando sus costos (Fagerberg & Verspagen, 2002; Kaldor et al., 1986; Kellman, 1983).

### 2.6 Tamaño de la Empresa

Las actividades de innovación conllevan un alto costo de operación y mantenimiento que solo puede ser soportado por empresas grandes con altos volúmenes de negocio (Klepper & M Cohen, 1996). Cohen (2010) señala que las empresas de gran tamaño generan economías a escala mediante de las actividades de I+D, a través de la adquisición de equipos especializados y contratación de personal multidisciplinario altamente capacitado, lo que conlleva a la generación de proyectos de innovación. Maskus (2000) y Battisti, Hollenstein, Stoneman y Woerter (2007) ilustran la innovación y adopción de innovación como un modelo de líder-seguidor, donde las empresas grandes son líderes y desarrollan primero una innovación y las empresas más pequeñas son seguidoras y se limitan a comprar o adquirir dicha innovación de las empresas grandes, convirtiéndose en adoptantes de innovación.

A pesar de que algunos autores concuerdan en que las firmas más grandes son las más propensas a innovar, existen otras teorías que afirman lo contrario. Tal es el caso de M. Rogers (2004), quien menciona que las empresas pequeñas tienen ciertas ventajas sobre las empresas más grandes. Las empresas más pequeñas serían más rápidas para reconocer oportunidades, más flexibles para investigar o implementar innovaciones, ajustan mejor los incentivos a sus empleados para garantizar un esfuerzo innovador óptimo, y su administración es menos rígida. En su estudio realizado para las empresas de Australia encontró que aquellas firmas pequeñas son más innovadoras en principio, no obstante, esta va decreciendo conforme aumenta el tamaño de las firmas. Otro estudio semejante fue desarrollado por B. Tether (1998), quien, utilizando los datos provenientes de la Unidad de Investigación de Políticas Científicas (Reino Unido) y *Small Business Administration* (EEUU), encontró que las empresas más pequeñas son las que más innovaciones tienen por empleado. Symeonidis (1996) explica que las empresas pequeñas se valen de sus ventajas competitivas en principio para incorporar innovaciones, de manera que puedan ganar una mayor participación en el mercado. No obstante, existiría un umbral en el cual la empresa se ve consolidada e innova con

menos frecuencia. Autant-Bernard et al. (2010) afirman que el tamaño de la firma podría influenciar en la rentabilidad de la innovación adoptada, debido a que las empresas más grandes afrontan menores riesgos asociados a invertir en una nueva. M. Cohen y Levinthal (1990) y Dougherty y Heller (1994) insisten en que las grandes empresas adoptan con mayor frecuencia debido a su alta capacidad de absorción.

### 2.7 Inversión en I+D

Las actividades de Investigación y Desarrollo, también conocidas como I+D, son realizadas por las empresas con el afán de mejorar su desempeño económico. Para esto deberán especializarse e incrementar sus capacidades de aprendizaje, lo que a futuro podría derivar en la conquista de nuevos mercados (Rosenberg, 1984). La explotación de innovaciones se produce cuando la empresa hace uso eficiente de sus recursos y tiene un buen desempeño en el mercado (Schumpeter, 1934).

Autores como Buesa, Heijs y Martínez (2019) utilizan los gastos de I+D interno para explicar la probabilidad de innovación para las empresas españolas. Adicionalmente, Griliches (1979) también afirma que los gastos de I+D interno inciden directamente con la innovación.

La orientación externa en I+D de una empresa permite acceder a una variedad de mecanismos que aumentan la probabilidad de que la información sobre innovaciones ingrese al sistema organizativo de quien decide adoptar (O. Hall, 1967; Kimberly & Evanisko, 1981). Liu et al. (2013) demuestra, a partir del caso de la economía china, que la contratación externa facilita las actividades de adquisición de innovaciones, aunque merman las capacidades locales de realizar esfuerzos internos, fortaleciendo así la competitividad extranjera. Las empresas locales que optan mayormente por realizar actividades de I+D externa se limitan a la compra o adquisición externa de innovaciones (Piga & Vivarelli, 2004).

### 2.8 Cooperación con Clientes y Proveedores

Según Hagedoorn (2002), las empresas se ven motivadas a realizar actividades de cooperación en innovación con el fin de minimizar los costos de desarrollar una nueva idea. Para D. Arthurs y Busenitz (2006), algunas empresas con ideas innovadoras podrían tener una escasez inicial de recursos y capacidades, especialmente si estas son de reciente creación. Bruton y Rubinak (2002) enuncian que las firmas pueden superar el entorno hostil y la falta de recursos aliándose con otra empresa que, con activos complementarios, recursos humanos y tecnología única, pueden coadyuvar al desarrollo de la innovación. En un entorno cooperativo, la tarea de un proyecto de innovación podría ser repartida entre sus participantes para un trabajo conjunto (B. S. Tether & Tajar, 2008). Así, cada firma se especializa en su área e invierte menos de lo que necesitaría si hiciera el proyecto por sí solo, generando así economías de escala (Bougrain & Haudeville, 2002) y reduciendo significativamente los costos fijos (Gans & Stern, 2003).

Rogers (1962) plantea que las actividades de cooperación funcionan como canales de comunicación que propagan la

existencia de una innovación dentro del sistema social. Además, asegura que una relación eficaz con proveedores y clientes mejora las capacidades de una empresa de reconocer nuevas tecnologías, que posteriormente serán adoptadas. Para Autant-Bernard et al. (2010), la cooperación con clientes y proveedores sirve para el desarrollo de insumos complementarios que fomentan la adopción de innovaciones. Rosenberg (1972) indica que la interacción con proveedores y clientes hace que se produzca la difusión de innovaciones a través de un intercambio continuo de mejoras en las tecnologías existentes, además de un intercambio de conocimientos. Adicionalmente, Lucas (1989) está de acuerdo en que durante las interacciones con clientes y proveedores se produce un intercambio intangible de ideas, lo cual da paso a la difusión de innovaciones y vuelve a las empresas más propensas a adoptar dichas ideas.

### 2.9 Grupo Empresarial

Según Rogers (1962), la comunicación eficiente entre las empresas promueve la difusión de innovaciones puesto que se da un intercambio continuo de aprendizaje (M. Cohen & Levinthal, 1990). Los grupos empresariales crean un mercado de financiamiento interno eficiente, con lo cual se puede acceder a fondos para desarrollar ideas con mayor facilidad, tomando prestado el dinero de otros integrantes del mismo grupo (Seru, 2007). En el mercado, la información entre empresas e inversores externos es asimétrica (Petersen & Himmelberg, 1994), por lo que las empresas confían en el financiamiento interno del capital del grupo para sus actividades de I+D, que es menos costoso que el financiamiento del mercado externo (Myers & Majluf, 1984). Para Belenzon y Berkovitz (2007), las empresas que se afilian a un grupo utilizan muy frecuentemente las innovaciones logradas por el resto de empresas pertenecientes al mismo grupo, por lo que, aunque la innovación no haya sido lograda por esfuerzos propios en principio, puede ser más accesible por la actitud colaborativa de las empresas dentro del grupo.

Técnicamente bastaría con que una de las empresas logre la innovación y el resto podría únicamente reutilizarla (Fisman & Khanna, 2004) lo que sería considerada una adopción de innovación. Autant-Bernard et al. (2010) encuentran un problema puntual en la construcción de esta variable puesto que algunas empresas pueden interpretar que las innovaciones internas logradas por otras empresas del mismo grupo les pertenecen, por lo que afirmarían que ellos lograron dicha innovación por cuenta propia. En este caso, no existe alguna forma de saber si esto ocurre o no, por lo que habría que acogerse a la posibilidad del dicho error.

### 2.10 Patentes

Un factor que se debe considerar son las patentes, que son un instrumento legal que conceden el derecho exclusivo de pertenencia de una invención nueva de producto o tecnología que es susceptible de ser comercializado por un lapso determinado de tiempo (Mansfield, 1986). Este factor surte un efecto ambiguo en la innovación. Según Arrow (1962), K. Whitaker y D. Nordhaus (1970), Merges y R. Nelson (1990) y

Rai y Jagannathan (2012), el uso de un sistema de protección formal de patentes incentivaría la innovación, debido a las garantías y beneficios que el inventor recibe, como el monopolio temporal, la protección contra imitadores y los ingresos percibidos por el uso de sus patentes. En el segundo caso, según Llanes y Stefano (2010) y Boldrin y K. Levine (2012), las patentes desalientan la innovación, debido a los elevados costos de las licencias o su repercusión negativa en el equilibrio de mercado.

## 3. DATOS Y METODOLOGÍA

Para este estudio se utilizaron los datos provenientes de la Encuesta de Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (ACTI) realizada por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología e Innovación conjuntamente con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en sus ediciones 2009-2011 y 2012-2014. Unificando ambas bases de datos, se construye un pool de datos con un total de 8 025 observaciones.

La naturaleza binaria de la variable dependiente, a saber, si una empresa adopta innovación, amerita un modelo de elección binaria *Probit*. En este análisis, solo aquellas empresas que obtienen una innovación pudieron elegir entre adopción o desarrollo propio. Esto implica que aquellas empresas que no hayan tenido alguna innovación no serían consideradas, lo que provocaría un sesgo de selección. Para resolver el problema de sesgo de selección, se acude al método de corrección desarrollado por Heckman<sup>5</sup> (1977). Por tanto, el método necesario para estimar la probabilidad de adoptar innovación corresponde al método Heckman-Probit. Dicho método consiste en una estimación en 2 etapas. En la primera, se estima un modelo de elección binaria Probit para la decisión de innovación, conocido como ecuación de selección, que se presenta a continuación.

$$Prob(Y = 1|X) = \Phi(X\beta) \quad (1)$$

Donde Y indica el estado innovador de la empresa:

1: Si la empresa logra una innovación o mejora significativa de bienes, servicios y/o procesos.

0: caso contrario.

$\Phi$  Es la función de distribución acumulativa de la distribución normal, X es un vector de variables explicativas,  $\beta$  un vector de parámetros asociados a dichas variables. Las variables explicativas de la innovación, X, se describen en la Tabla 1. Se puede denotar la ecuación (1) como un modelo de variable latente, suponiendo que existe una variable auxiliar asociado a la probabilidad de innovar, tal que:

$$Y^* = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

Se asume que el término de error asociado a la ecuación (2) está normalmente distribuido, con media cero y varianza uno, esto es:

$$\varepsilon \sim N(0,1) \quad (3)$$

<sup>5</sup> Esta metodología desarrollada por James Heckman (1977) lo hizo acreedor de un premio nobel.

A su vez, la ecuación (2) se puede representar de la siguiente forma:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{si } Y^* > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} = \begin{cases} 1 & \text{si } X\beta + \varepsilon > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

A continuación, se obtiene la probabilidad de una empresa de innovar como un modelo Probit ordinario que se estima a través de máxima verosimilitud<sup>6</sup>, representado de la siguiente manera:

Se tiene un conjunto de datos con n observaciones:

$$\{x_i y_i\}_{i=1}^n \quad (5)$$

Entonces, la función de máxima verosimilitud está representada por:

$$\ln(\beta) = \sum_{i=1}^n y_i \ln \phi(x'_i \beta) + (1 - y_i) \ln(1 - \phi(x'_i \beta)) \quad (6)$$

A partir de la ecuación (6) se obtienen los estimadores  $\hat{\beta}$ :

$$\hat{\beta} = \arg \max_{\beta} \ln L(\beta) \quad (7)$$

A partir de dicha estimación se calcula el factor conocido como el *Ratio Inverso de Mills*, denotado por:

$$\lambda(-\hat{x}_i \hat{\beta}) = \frac{\varphi(-\hat{x}_i \hat{\beta})}{\Phi(-\hat{x}_i \hat{\beta})} \quad (8)$$

Donde:

$\hat{x}_i$ : Valores predichos para la ecuación de innovación, cambiados a  $-\hat{x}_i \hat{\beta}$  por la ley de simetría de la distribución normal.

$\varphi(-\hat{x}_i \hat{\beta})$ : Función de densidad de la distribución normal evaluada en  $-\hat{x}_i \hat{\beta}$ .

$\Phi(-\hat{x}_i \hat{\beta})$ : Función de densidad acumulada evaluada en  $-\hat{x}_i \hat{\beta}$

Una vez obtenido el *Ratio Inverso de Mills*, se añade a la especificación del modelo de adopción, dando comienzo a la segunda etapa. En esta etapa se estima el modelo de adopción de innovación, incluyendo el *Ratio Inverso de Mills* como una variable explicativa adicional para corregir el sesgo de selección. El modelo de la segunda etapa asociado a la probabilidad de adoptar innovación, está denotado por:

$$Prob(w = 1|z) = \Phi(z\alpha) \quad (9)$$

Donde  $w$  representa si la empresa decide adoptar una innovación, lo cual no se puede observar si la empresa no logra una innovación en primer lugar,  $z$  representa un vector de variables independientes y  $\alpha$  un vector de parámetros, ambos evaluados en una función de distribución normal acumulada  $\Phi$ . Las variables explicativas de la adopción de innovación se describen en la Tabla 1. Este modelo también se puede denotar como un modelo de variables latente, suponiendo que existe una variable auxiliar:

$$W^* = z\alpha + \mu \quad (10)$$

Al igual que con la ecuación (2), se asumen que el error asociado a la probabilidad de adoptar tiene una distribución normal, con media cero y varianza 1.

$$u \sim N(0,1) \quad (11)$$

La ecuación (10) puede representarse de la siguiente manera:

$$A = \begin{cases} 1 & \text{si } W^* > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} = \begin{cases} 1 & z\alpha + \mu > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (12)$$

Como lo que se desea es obtener la probabilidad de que una empresa realice una adopción de innovación, dado que introdujo alguna innovación, y, una vez añadido el *Ratio Inverso de Mills* como una nueva variable explicativa adicional, se tiene:

$$E[W = 1|z, Y = 1] = \Phi[z\alpha + \rho\sigma_u \lambda(-\hat{x}_i \hat{\beta})] \quad (13)$$

Donde:

$\Phi$ : Función de distribución acumulativa de la distribución normal.

$\rho$ : Correlación entre los factores no observados de la propensión a innovar  $\varepsilon$  y de la propensión a adoptar  $u$ .

$\sigma_u$ : Desviación estándar de  $u$

$\lambda$ : *Ratio Inverso de Mills* evaluada en  $-\hat{x}_i \hat{\beta}$ .

Los parámetros para la ecuación de adopción se estiman a través de máxima verosimilitud, de la misma manera que la ecuación (6) y (7).

Según Heckman (1977), como  $\sigma_u > 0$ , el coeficiente asociado a  $\lambda$  solo puede ser cero si  $\rho = 0$ , con lo que probar la hipótesis nula de que el coeficiente de  $\lambda$  es cero equivale a probar la selectividad de la muestra.

### 3.1 Descripción de Variables

Al tratarse de una estimación en 2 etapas, existen entonces 2 variables independientes, en la ecuación de innovación viene representada de la siguiente manera:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{si introdujo una innovación} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (14)$$

Se desarrollarán 3 estimaciones econométricas, por lo cual habrá 3 variables independientes, una que explique la propensión a innovar en productos, otra en proceso y una que abarque ambos casos simultáneamente. La variable dependiente de la segunda etapa también contemplará aquellos 3 casos y se representa de la siguiente manera:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{si adopta la innovación} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (15)$$

A continuación, se citan todas las variables independientes que serán utilizadas en el modelo econométrico, cada una incluirse en la ecuación de primera etapa, segunda etapa o en ambos casos simultáneamente.

<sup>6</sup> Método para estimar los parámetros no conocidos  $\hat{\beta}$  desarrollado por Aldrich (1997)



Tabla 1. Variables Independientes

Variable Independiente	Descripción
<b>Afectan a la Innovación y Adopción de Innovaciones</b>	
Nivel de Personal Altamente Cualificado	Número de trabajadores con título de tercer nivel o superior.
Innovación Organizacional	Igual a 1 si la empresa obtuvo una innovación organizacional, 0 caso contrario.
Financiamiento Público	Igual a 1 si la firma recibió financiamiento público, 0 caso contrario.
Alta Intensidad en Conocimiento	Igual a 1 si la empresa pertenece a una industria intensiva en conocimiento, 0 caso contrario.
Ln (Exportaciones Promedio)	Promedio de exportaciones en los 3 últimos años en logaritmo.
<b>Afectan Únicamente a la Innovación</b>	
Ln (Ventas Promedio)	Promedio de las ventas en los 3 últimos años en logaritmo.
(Ln (Ventas Promedio)) ^2	Promedio de las ventas en los 3 últimos años en logaritmo elevado al cuadrado.
Ln (I+D Interna Promedio)	Promedio de los gastos en I+D interna de los 3 últimos años en logaritmo.
Patentes	Igual a 1 si la firma ha emprendido búsqueda de patentes, 0 caso contrario.
Alta Intensidad Tecnológica	Igual a 1 si la empresa pertenece a una industria intensiva en tecnología, 0 caso contrario.
<b>Afectan Únicamente a la Adopción de Innovaciones</b>	
Ln (Ventas Promedio Ponderadas)	Promedio de ventas en los 3 últimos años ponderadas de acuerdo al sector al que pertenecen en logaritmo.
Ln (Ventas Promedio Ponderadas) ^2	Promedio de ventas en los 3 últimos años ponderadas de acuerdo al sector al que pertenecen en logaritmo elevado al cuadrado.
Ln (I+D Externa Promedio)	Promedio de los gastos en I+D externa de los 3 últimos años en logaritmo.
Cooperación con Clientes y Proveedores.	Igual a 1 si la empresa realizó cooperación con clientes o proveedores, 0 caso contrario.
Grupo Empresarial	Igual a 1 si la firma pertenece a un grupo empresarial, 0 caso contrario

Se ha optado por ponderar el volumen de ventas respecto al sector en el que pertenecen, esto con el fin de diferenciar la ecuación de selección de la ecuación de adopción de innovaciones, en concordancia con la metodología aplicada por Autant-Bernard et al. (2010) para la economía de la Unión Europea.

## 4. RESULTADOS

En la siguiente tabla se presentan las estimaciones de los modelos Heckman-Probit. En la parte superior de la Tabla 2 se muestran los efectos marginales de la ecuación de selección de innovación de la primera etapa y en la parte inferior se muestran los resultados de la ecuación de la adopción de la segunda etapa. En la columna (1) se muestra el modelo que abarca las innovaciones en productos y procesos, en la columna (2) se muestra el modelo de innovación en productos y en la columna (3) es el modelo de innovación en procesos.

Tabla 2. Resultados de las Estimaciones Econométricas Heckman-Probit

Variable	(1)	(2)	(3)
<b>Adopción</b>			
Ln (Ventas Promedio Ponderadas)	-0,0353** (0,0101)	-0,0416*** (0,0661)	-0,0152 (0,0643)
Ln (Ventas Promedio Ponderadas) ^2	0,0020*** (0,0023)	0,0022*** (0,0022)	0,0008 (0,0101)
Ln (I+D Externa Promedio)	0,0248*** (0,0098)	0,0167*** (0,0112)	0,0190*** (0,0101)
Nivel de Personal Altamente Cualificado	0,0001*** (0,0001)	0,0001** (0,0002)	0,0002*** (0,0001)
Innovación Organizacional	0,0756*** (0,0506)	0,0264 (0,0649)	0,0958*** (0,0587)
Financiamiento Público	0,1062*** (0,1236)	0,0583 (0,1485)	0,1098*** (0,1386)
Alta Intensidad en Conocimiento	0,0917*** (0,0568)	0,1140*** (0,0712)	0,6080*** (0,0643)
Cooperación con Clientes y Proveedores	0,1006*** (0,0574)	0,0765*** (0,0079)	0,0876*** (0,0642)
Grupo Empresarial	0,1084*** (0,0609)	0,0844*** (0,0777)	0,1160*** (0,0664)
Ln (Exportaciones Promedio)	-0,0055*** (0,0053)	-0,0045 (0,0070)	-0,0041** (0,0085)
Inversa de Mills	0,0887*** (0,0594)	0,0590*** (0,0773)	0,1386*** (0,0811)
Nro. de empresas innovadoras	3 376	2 246	2 585
<b>Innovación</b>			
Ln (Ventas Promedio)	0,0424*** (0,0585)	0,0084 (0,0559)	0,0460*** (0,0614)
Ln (Ventas Promedio) ^2	-0,0019*** (0,0021)	-0,0069 (0,0020)	-0,0016 (0,0022)
Ln (I+D Interna Promedio)	0,1463*** (0,0152)	0,0590*** (0,0071)	0,0631*** (0,0072)
Nivel de Personal Altamente Cualificado	0,0005*** (0,0002)	0,0002*** (0,0017)	0,0003*** (0,0002)
Innovación Organizacional	0,2245*** (0,0356)	0,1380*** (0,0354)	0,2008*** (0,0344)
Financiamiento Público	0,4920*** (0,2034)	0,3500*** (0,1213)	0,3658*** (0,1266)
Alta Intensidad en Conocimiento	0,0897*** (0,0395)	0,1418*** (0,0389)	0,0273** (0,0391)

Alta Intensidad Tecnológica	0,0750*** (0,0764)	0,1263*** (0,0719)	0,0620*** (0,0709)
Patente	0,2065*** (0,0613)	0,1867*** (0,0569)	0,1373*** (0,0558)
Ln (Exportaciones Promedio)	0,0017 (0,0038)	0,0013 (0,0354)	0,0012 (0,0037)
$\rho$	0,2684	0,1977	0,4115
LR test <sup>7</sup> ( $\rho = 0$ ):	chi2(1) = 18,72 Prob>chi2 = 0,0000	chi2(1) = 6,61 Prob>chi2 = 0,0102	chi2(1) = 26,58 Prob>chi2 = 0,0000
Correcta clasificación	68,25%	76,27%	69,86%
N	8025	8025	8025

Se añaden el error estándar y el efecto parcial, este último representa el cambio que experimenta la variable dependiente de cada ecuación por cada unidad adicional de esa variable independiente. Entre paréntesis se encuentra el error estándar correspondiente a cada variable. El nivel de significancia se visualiza de acuerdo al número de asteriscos (\*\*\*)=0%; \*\*=5%; \*=10%; sin asteriscos= no es significativo)

En el modelo general para productos y procesos, todas las variables resultaron ser significativas a un 95% de confianza, tanto en innovación como en adopción, a excepción de las exportaciones, los cuales no resultaron ser significativas en innovación. Como el coeficiente relacionado a la Ratio Inverso de Mills es significativo, se rechaza la hipótesis de la nulidad de la correlación entre los factores no observados de la propensión a innovar y de la propensión a adoptar. Así, se corrigió exitosamente el sesgo de selección a través de la metodología Heckman-Probit.

El tamaño de las empresas medido a través del volumen de ventas muestra tener una relación con la adopción de innovación en forma de U como se muestra en la Figura 1. El incremento por cada unidad adicional de este factor no es lineal, sino que depende de las ventas<sup>8</sup>. Las empresas pequeñas tienen menor propensión a adoptar innovaciones en principio hasta alcanzar un umbral de aproximadamente \$1 468 en ventas anuales<sup>9</sup>, a partir del cual aumenta la propensión a adoptar innovaciones. Como el umbral estimado es relativamente bajo, se puede decir que la mayoría de empresas tienden a adoptar innovaciones. La alta capacidad de absorción de las empresas grandes les permite adoptar innovaciones (Autant-Bernard et al., 2010; Dougherty & Heller, 1994; M. Cohen & Levinthal, 1990). Este factor aparenta no tener efecto cuando se trata de adopción de innovación en procesos.

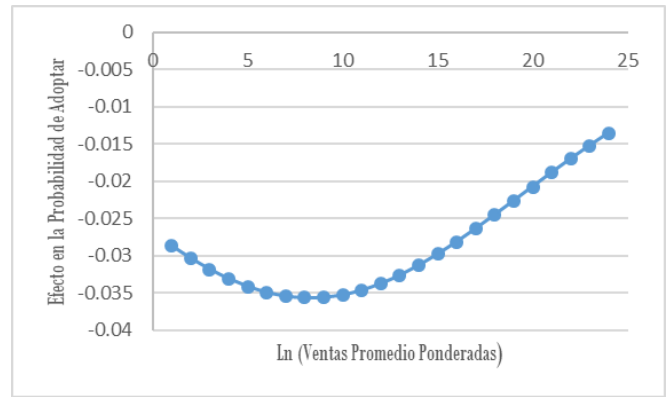


Figura 1. Efecto marginal del tamaño de la empresa sobre la adopción de innovaciones

Respecto a la innovación se obtuvo una relación en forma de U invertida con el tamaño de la empresa como se muestra en la Figura 2. Conforme la empresa va creciendo, alcanza un umbral de tamaño de aproximadamente \$61 960 026 en ventas anuales, posteriormente se ve consolidada dentro del mercado y su innovación es cada vez menor. Como el umbral es alto, se puede decir que la mayoría de empresas incrementan su nivel de innovación conforme crecen (M. Rogers, 2004; B. Tether, 1998). Dentro de la innovación en productos, esta variable no resultó relevante.

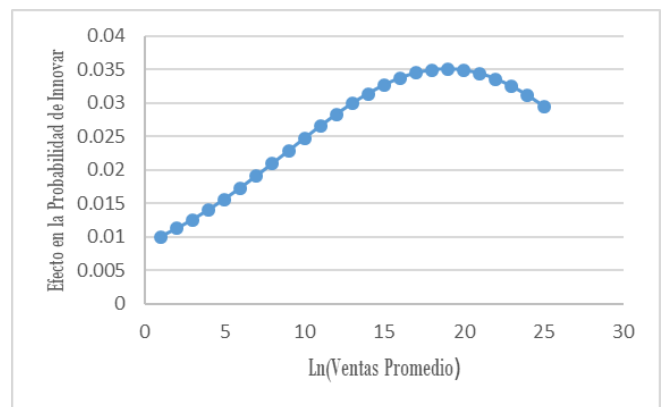


Figura 2. Efecto marginal entre el tamaño de la empresa y la innovación

El nivel de gastos en I+D externo resultó tener un signo positivo con la adopción, es decir, que mientras una empresa incrementa sus recursos destinados a I+D de origen externo también incrementará su propensión a adoptar una innovación, ya sea de productos o procesos, en concordancia con Kimberly y Evanisko (1981), Liu et al. (2013) y O. Hall (1967). Un incremento en 1% en los gastos de I+D externa incrementa la propensión de la empresa a adoptar una innovación en productos en 0,017% y en procesos en 0.019%. Los gastos en I+D interna resultaron tener un efecto positivo en la innovación, en concordancia con la teoría citada por

<sup>7</sup> Este test tiene por hipótesis inicial la correlación entre los factores no observados de la propensión a innovar  $\epsilon$  y de la propensión a adoptar  $u$  es cero, es decir, que el coeficiente correspondiente al Ratio Inverso de Mills es cero, que implicaría que no hubo sesgo de selección que debió corregirse, al rechazarse esta hipótesis implicaría que la metodología fue apropiada.

<sup>8</sup> La función está definida por:  
 $\frac{\Delta Prob(Y=1|X_{ik})}{\Delta(\ln(X_k))} = \Phi(X_i B) * (B_1 + 2 * B_2 * \ln(X_k))$  donde:  
 Y: Variable independiente (Innovación o adopción)  
 X<sub>k</sub>: Variable independiente de la cual se busca obtener la relación marginal (ventas en logaritmos)

X<sub>i</sub>: Variables Independientes  
 B: Coeficiente relacionado a la variable independiente  
 Φ: Función de densidad de la distribución normal

<sup>9</sup> Cuando el logaritmo natural de las ventas anuales promedio llega a ser de 7.292, el efecto marginal respecto a la probabilidad de adoptar comienza a ser creciente. Aplicando la función inversa del logaritmo natural, las ventas resultan ser de \$1.468.

Rosenberg (1984), Griliches (1979) y la evidencia empírica de Buesa et al. (2019). Un incremento en 1% en los gastos de I+D interna de la empresa incrementa la propensión de la empresa a innovar en productos en 0,059% y en procesos en 0,063%.

La pertenencia al sector de Alta Intensidad en Conocimiento muestra tener una relación positiva con la adopción. Aquellas empresas que pertenecen a este sector tienen mayor propensión de 9,17% a adoptar innovaciones en comparación a aquellas que no pertenecen a dicho sector<sup>10</sup>. Esto se debe a sus altos niveles de conocimiento técnico, científico y su alta capacidad de absorción de conocimiento, en concordancia con Rogers, (1962) y M. Cohen y Levinthal, (1990). Se puede apreciar a su vez que el efecto es mucho mayor en la propensión de adoptar innovaciones en procesos (60,8%) que en productos (11,40%), lo cual indica que el recurso intelectual de la empresa es mucho más efectivo en la absorción de conocimiento para la adopción de procesos que en productos (M. Cohen & Levinthal, 1990), que va directamente relacionado en mejoras en los procesos de la organización. La incidencia sobre la probabilidad de innovar de la pertenencia a un sector con alta intensidad de conocimiento es mayor para la innovación propia en productos (14%) que para la innovación propia en procesos (2,7%), en concordancia con Lamberton (1986), Hollander (2007), Freeman (1988), Metcalfe y Miles (2000) y M. Cohen y Levinthal (1990). Las empresas del sector de Alta Intensidad Tecnológica son más propensas a innovar en 7,61% en comparación a aquellas que no pertenecen a este sector. El efecto es superior para la propensión a innovar en productos (12,6%) que para la propensión en innovar en procesos (6,2%). Esto se explica porque la disposición de tecnologías se destina principalmente a la innovación en productos, de acuerdo con Savic et al., (2014), Z. Acs y Armington (2004), Hausmann (2003), Fagerberg (1988), Jaff (1986), Balcerowicz P. Keczkowski y W. Katek-Rubiak (2009).

El nivel de personal altamente cualificado también resultó tener un efecto positivo con la adopción de innovaciones. Las empresas ecuatorianas estarían absorbiendo el conocimiento externo e interno, que es posteriormente asimilado y utilizado para incorporar eficientemente las innovaciones adoptadas dentro de sus instalaciones (M. Cohen & Levinthal, 1990; Nelson & Phelps, 1965). Por cada unidad adicional en el personal altamente cualificado de la empresa, la propensión a adoptar innovaciones en producto incrementa en un 0.01% y en proceso en un 0.02%. En lo que corresponde a innovación, el hecho de poseer un mayor personal con un alto nivel de preparación académico también hace que las firmas tengan mayores oportunidades de innovar. El incremento que percibe la innovación por cada unidad adicional en este factor es de 0,05%. El recurso intelectual de las empresas resulta beneficioso para el comportamiento innovador de las empresas en concordancia con Lundvall (2019) y Bordogna, Fromm y Ernst (1993) y E. Porter y Stern (2000).

Haber logrado una innovación organizacional tuvo una relación positiva con la adopción de innovaciones. Este resultado implicaría que las mejoras en la estructura

organizacional influyen en los procesos de comunicación interna de la empresa, que, consecuentemente, incrementan su capacidad de absorción de conocimiento, lo cual surte efecto en incrementar su propensión a adoptar innovaciones, estos resultados concuerdan con las teorías de Autant-Bernard et al. (2010), Rogers (1962), Lane y Lubatkin (1998) y Lenox y King (2004). En término de efectos marginales, si una empresa innovadora incorpora una innovación organizacional la probabilidad de que adopte una innovación incrementa en un 7,56%. No obstante, este aspecto no fue relevante para explicar la adopción de innovación en productos.

Respecto a la innovación también se obtuvo un efecto positivo, las empresas que hayan logrado incorporar alguna innovación organizacional en sus instalaciones tendrían una mayor capacidad de innovar en productos y/o procesos, acorde con lo mencionado por Drucker (1985), Hagedoorn (2002), Schumpeter (1934), Lugones et al. (2019), Damanpour y Gopalakrishnan (2001) y Naranjo-Valencia et al. (2012). Específicamente su probabilidad de innovar incrementa en un 22,45%.

El financiamiento público resultó tener un signo positivo con la innovación, es decir que los instrumentos utilizados por el gobierno (subsidios, exoneraciones, créditos, etc.) cumplen su objetivo de promover la innovación, que también vuelve a las empresas más susceptibles de adoptar dicha innovación. El hecho de que una empresa innovadora reciba financiamiento público hace que esta incremente su propensión a adoptar esa innovación en un 10.62%. Particularmente se obtuvo el mismo resultado que el estudio empírico de Autant-Bernard et al. (2010). Este aspecto no resulta relevante para explicar la adopción de innovación en productos. En cuanto a la innovación, el incremento adicional por tener financiamiento público es de 49,20%.

El hecho de pertenecer a un grupo empresarial incrementa la propensión a adoptar una innovación en un 10,84%. Esto se debe a la ventaja de poder acceder a las nuevas tecnologías de las otras empresas que pertenecen al grupo, el mercado financiero interno, la actitud colaborativa, y el intercambio de aprendizaje que promueve la difusión de innovaciones, en concordancia con Belenzon y Berkovitz, (2007), M. Cohen y Levinthal, (1990) y Autant-Bernard et al. (2010). Adicionalmente, el efecto es significativamente mayor en procesos que en productos, ya que la pertenencia a un grupo empresarial está asociado a los cambios en la estructura organizacional de la empresa, que deriva en cambios y mejoras en los procesos (Autant-Bernard et al., 2010).

Las actividades de cooperación con clientes y proveedores tuvieron en efecto positivo con la adopción de innovaciones. Aquellas empresas que realizan estas actividades de cooperación incrementarían su propensión a adoptar innovaciones en un 10,06%. Este factor funciona como una fuente de conocimiento que forman canales de intercambio y comunicación entre empresas que propagan la existencia de una innovación, dando lugar al proceso de difusión de innovaciones, lo que permite a las empresas reconocer e

<sup>10</sup> Su interpretación se realiza con respecto a aquellas industrias que no se encuentran en este sector

incorporar innovaciones según las teorías citadas por Rogers (1962), Autant-Bernard et al. (2010), Rosenberg (1972) y Lucas (1989).

Las empresas que participan en los mercados internacionales a través de la exportación no ven incrementada su innovación, ya sea por adopción o por desarrollo propio, lo que implicaría que el intercambio de recursos tangibles e intangibles que se producen en el comercio exterior a través de canales de difusión citados por Rogers (1962), Coe et al. (2009), Fagerberg y Verspagen (2002) y Keller (1997) y la presión sobre la competitividad de las empresas enunciado por Autant-Bernard et al. (2010), Kaldor, Sharp y Walker (1986) y Kellman (1983) no surten efecto.

Las patentes resultaron tener un efecto positivo en la innovación, es decir, que los beneficios como el monopolio temporal, la protección contra imitadores y el cobro por licencias son aprovechados por las firmas ecuatorianas para impulsar la innovación, dichos resultados concuerdan con Arrow (1962), K. Whitaker y D. Nordhaus (1970), Gedik (2012), Merges y R. Nelson, (1990), Rai y Jagannathan, (2012). Aquellas empresas que emprenden la búsqueda de patentes incrementan su propensión a innovar en un 20,65%.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través de un análisis descriptivo, se pudo verificar que Ecuador no ha tenido un posicionamiento favorable en comparación al resto del mundo en temas de innovación. Esto puede deberse al bajo nivel de innovación de las empresas ecuatorianas que mayoritariamente realizan innovaciones de mejora significativa o no innovaciones nuevas. Otro aspecto importante del comportamiento innovador de las empresas es que una gran parte de ellas adoptan innovación. Con el objetivo de identificar los factores que incentivan la adopción, se empleó un modelo Probit. Los resultados mostraron que los grupos empresariales, la innovación organizacional y la cooperación con clientes o proveedores promueven la creación de canales de intercambio de recursos tangibles e intangibles que propagan las innovaciones y facilitan la adopción de las mismas. El personal altamente cualificado puede también promover la adopción de innovaciones. En un entorno de industrias con requerimientos científicos altos, las empresas tienen una alta probabilidad de adoptar innovación. Las empresas ecuatorianas parten siendo bastante innovadoras hasta alcanzar un umbral en ventas de \$61 960 026 anuales, momento desde el cual se ve consolidado en el mercado y empiezan a innovar cada vez menos. En cuanto a la adopción, las empresas comienzan a hacerlo a partir de un bajo umbral de solo \$1 468 en ventas anuales. Los recursos que las empresas ecuatorianas destinan a la Investigación y Desarrollo de origen externo harían que se vuelvan más susceptible en adoptar innovaciones. La propensión a generar innovaciones propias incrementaría con la inversión en recursos de I+D interna. La presión de la competitividad internacional y el intercambio de tecnologías y conocimientos que se producen con las exportaciones no influyen en el comportamiento innovador de las empresas ecuatorianas. El apoyo gubernamental promueve la innovación y la adopción de innovaciones como resultado de los instrumentos financieros otorgados por entidades públicas.

Las patentes tienen la capacidad de promover la innovación en lugar de desincentivarla, este efecto puede deberse a sus beneficios asociados como el monopolio temporal, protección contra imitadores y costo de las licencias de uso. Las industrias que requieren un uso intensivo de tecnología en sus instalaciones tienen una mayor propensión a innovar, tanto en productos como en proceso.

### 5.1 Recomendaciones

En función al objetivo y resultados de esta investigación, se proponen recomendaciones dirigidas a sectores influyentes en tecnología y desarrollo de innovaciones, tanto públicos como privados. Para aumentar la propensión de las empresas a innovar y adoptar innovación, se debe incentivar la formación del capital humano. Para ello, se debe impulsar el acceso de la población a la educación superior de calidad. Así, los trabajadores capacitados aumentarán la capacidad de absorción y generación de conocimiento de las empresas para adoptar innovaciones o innovar con mayor facilidad. Otro factor clave a impulsar es la inversión de investigación y desarrollo tanto interna como externa. En este aspecto, el contexto actual indica que las empresas tienen poco interés en este tipo de inversión. Solo un 22.7% invierte en I+D en los años 2011 y 2014. Para mejorar este indicador, se necesita impulsar la cooperación con las universidades. En vista de que las actividades colaborativas como las agrupaciones empresariales y la cooperación con clientes y proveedores tienen una influencia positiva en la adopción de innovación, es necesario aprovechar al máximo los canales de comunicación e intercambio por los cuales se transfiere la existencia de una innovación. De esta manera, las empresas ecuatorianas podrían incorporarlas eficientemente dentro de sus firmas y obtener beneficios. Dado que la proporción de empresas innovadoras decrece, es recomendable para los entes influyentes en los sectores productivos desarrollar programas y nuevos incentivos que motiven a las empresas a innovar.

Esta investigación sugiere algunas pistas de investigación futura. Una de ellas es la consideración de la intensidad de adopción de innovación para conocer en qué medida las empresas adoptan innovación y si esta es mayor que la innovación propia. Otra línea de investigación es discernir sobre la importancia relativa de los efectos de la adopción de la innovación respecto a los de la innovación propia, analizando variables de rendimiento.

## REFERENCIAS

- Acs, Z., & Armington, C. (2004). Employment Growth and Entrepreneurial Activity in Cities. *Regional Studies*, 38, 911–927.  
<https://doi.org/10.1080/0034340042000280938>
- Albis Salas, N. (2015). Determinantes de la innovación y la productividad en las subsidiarias extranjeras y las empresas exportadoras en la industria en Colombia. *Revista de Estudios Empresariales. Segunda Época*, 2.  
<https://doi.org/10.17561/ree.v0i2.2740>
- Aldrich, J. (1997). R. A. Fisher and the Making of Maximum Likelihood 1912-22. *Statistical Science*, 12 (3), 162-176.

- Arrow, K. (1962). Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention. In *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors* (pp. 609–626). National Bureau of Economic Research, Inc. <https://econpapers.repec.org/RePEc:nbr:nberch:2144>
- Arundel, A. (2007). Innovation survey indicators: What impact on innovation policy? *Science, Technology and Innovation Indicators in a Changing World: Responding to Policy Needs*.
- Autant-Bernard, C., Billand, P., & Massard, N. (2012). Innovation and Space From Externalities to Networks. *Knowledge and Talent in Regional and Global Context*.
- Autant-Bernard, C., Guironnet, J.-P., & Massard, N. (2010). The Determinants of Innovation Adoption. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1731550>
- Balcerowicz, E., Pikeckowski, M., & Wzi\katek-Kubiak, A. (2009). *The innovation patterns of firms in low and high technology manufacturing sectors in the new member states* (Issue 390). Center for Social and Economic Research (CASE). <http://hdl.handle.net/10419/128191>
- Battisti, G., Hollenstein, H., Stoneman, P., & Woerter, M. (2007). Inter and Intra firm diffusion of ICT in the United Kingdom (UK) and Switzerland (CH). An internationally comparative study based on firm-level data. *Economics of Innovation and New Technology*, 16(8), 669–687. <https://doi.org/10.1080/10438590600984026>
- Belenzon, S., & Berkovitz, T. (2007). Innovation in Business Groups. *Centre for Economic Performance, LSE, CEP Discussion Papers*, 56. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1026110>
- Benhabib, J., & Spiegel, M. (2005). Human Capital and Technology Diffusion. In P. Aghion & S. Durlauf (Eds.), *Handbook of Economic Growth* (1st ed., Vols. 1, Part A, pp. 935–966). Elsevier. <https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:grochp:1-13>
- Boldrin, M., & Levine, D. (2012). The Case Against Patents. *Journal of Economic Perspectives*, 27. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2148738>
- Bordogna, J., Fromm, E., & Ernst, E. W. (1993). Engineering Education: Innovation Through Integration. *Journal of Engineering Education*, 82(1), 3–8. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.1993.tb00065.x>
- Bougrain, F., & Haudeville, B. (2002). Innovation, collaboration and SMEs internal research capacities. *Research Policy*, 31(5), 735–747. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00144-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00144-5)
- Bruton, G. D., & Rubanik, Y. (2002). Resources of the firm, Russian high-technology startups, and firm growth. *Journal of Business Venturing*, 17(6), 553–576. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0883-9026\(01\)00079-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0883-9026(01)00079-9)
- Buesa, M., Baumert, T., Heijs, J., & Martinez, M. (2019). *Los factores determinantes de la innovación: un análisis econométrico*.
- Chaminade, C., & Vang, J. (2008). Globalisation of knowledge production and regional innovation policy: Supporting specialized hubs in the Bangalore software industry. *Research Policy*, 37(10), 1684–1696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.08.014>
- Coe, D. T., Helpman, E., & Hoffmaister, A. W. (2009). International R&D spillovers and institutions. *European Economic Review*, 53(7), 723–741. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2009.02.005>
- Cohen, W. M. (2010). *Fifty Years of Empirical Studies of Innovative Activity and Performance* (Vol. 1, pp. 129–213). Elsevier. [https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:haechp:v1\\_129](https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:haechp:v1_129)
- Cornel SC Johnson College of Bussines. (2019). *The Global Innovation Index*.
- D. Arthurs, J., & Busenitz, L. (2006). Dynamic Capabilities and Venture Performance: The Effects of Venture Capitalists. *Journal of Business Venturing*, 21, 195–215. <https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2005.04.004>
- Damanpour, F., & Gopalakrishnan, S. (2001). The Dynamics of the Adoption of Product and Process Innovations in Organizations. *Journal of Management Studies*, 38, 45–65. <https://doi.org/10.1111/1467-6486.00227>
- Dougherty, D., & Heller, T. (1994). The Illegitimacy of Successful Product Innovation in Established Firms. *Organization Science - ORGAN SCI*, 5, 200–218. <https://doi.org/10.1287/orsc.5.2.200>
- Drucker, P. (1985). Innovation and Entrepreneurship: Practice and Principles. *Public Productivity Review*, 10. <https://doi.org/10.2307/3380320>
- E. Porter, M., & Stern, S. (2000). *Measuring the “Ideas” Production Function: Evidence from International Patent Output*.
- Fagerberg, J. (1988). International Competitiveness. *Economic Journal*, 98(391), 355–374. <https://econpapers.repec.org/RePEc:ecj:econjl:v:98:y:1988:i:391:p:355-74>
- Fagerberg, J., & Verspagen, B. (2002). Technology-gaps, innovation-diffusion and transformation: an evolutionary interpretation. *Research Policy*, 31(8), 1291–1304. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00064-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00064-1)
- Fisman, R., & Khanna, T. (2004). Facilitating Development: The Role of Business Groups. *World Development*, 32(4), 609–628. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2003.08.012>
- Freeman, C. (1988). Technology policy and economic performance; lessons from Japan: Christopher Freeman, (Frances Printer Publishers, London, New York, 1987) pp. 155, [UK pound]20.00. *Research Policy*, 17(5), 309–310.
- Gans, J. S., & Stern, S. (2003). The product market and the market for “ideas”: commercialization strategies for technology entrepreneurs. *Research Policy*, 32(2), 333–350. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00103-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00103-8)
- Gedik, Y. (2012). Geographical Localisation of Knowledge Spillovers by Australian Patent Citations\*. *Economic Papers: A Journal of Applied Economics and Policy*, 31(2), 173–181. <https://doi.org/10.1111/j.1759-3441.2012.00172.x>

- Griliches, Z. (1979). Issues in Assessing the Contribution of R&D to Productivity Growth. *Bell Journal of Economics*, 10, 92–116.  
<https://doi.org/10.2307/3003321>
- Hagedoorn, J. (2002). Inter-Firm R&D Partnerships: An Overview of Major Trends and Patterns Since 1960. *Research Policy*, 31, 477–492.  
[https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00120-2](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00120-2)
- Hall, B. H., & Lerner, J. (2010). Chapter 14 - The Financing of R&D and Innovation. In B. H. Hall & N. Rosenberg (Eds.), *Handbook of The Economics of Innovation*, Vol. 1 (Vol. 1, pp. 609–639). North-Holland.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-7218\(10\)01014-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)01014-2)
- Hall, O. (1967). *Medical Innovation: A Diffusion Study*. By James S. Coleman, Elihu Katz, and Herbert Menzel. Foreword by Joseph A. Precker. Indianapolis: The Bobbs-Merrill Company, 1966. 246 pp. Illustrated. \$2.95. Paper. *Social Forces*, 46(2), 291.  
<https://doi.org/10.2307/2574625>
- Hausmann, R., & Rodrik, D. (2003). Economic development as self-discovery. *Journal of Development Economics*, 72(2), 603–633.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3878\(03\)00124-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3878(03)00124-X)
- Heckman, J. (1977). Sample Selection Bias As a Specification Error (with an Application to the Estimation of Labor Supply Functions). *National Bureau of Economic Research, Inc, NBER Working Papers*.
- Hobday, M. (2005). Firm-Level Innovation Models: Perspectives on Research in Developed and Developing Countries. *Technology Analysis and Strategic Management*, 17.  
<https://doi.org/10.1080/09537320500088666>
- Hollander, S. (2007). The Sources of Increased Efficiency: A Study of DuPont Rayon Plants. In *Technology and Culture* (Vol. 7). <https://doi.org/10.2307/1054889>
- Huergo, E., & Moreno, L. (2015). *National or international public funding? Subsidies or loans? Evaluating the innovation impact of R&D support programmes*. <https://econpapers.repec.org/RePEc:pra:mprapa:64926>
- Iammarino, S., Sanna-Randaccio, F., & Savona, M. (2007). *The perception of obstacles to innovation. Multinational and domestic firms in Italy*.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos/Senecyct. (2015). *Encuesta de Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación*. 64.
- Jaffe, A. (1986). Technological Opportunity and Spillovers of R&D: Evidence from Firms' Patents, Profits, and Market Value. *American Economic Review*, 76(5), 984–1001.  
<https://econpapers.repec.org/RePEc:aea:aecrev:v:76:y:1986:i:5:p:984-1001>
- Jameson, F. (2016). *Third-World Literature in the Era of Multinational Capitalism* (pp. 71–90).  
<https://doi.org/10.1002/9781119118589.ch5>
- Jovanovic, B., & Rob, R. (1989). The Growth and Diffusion of Knowledge. *Review of Economic Studies*, 56, 569–582. <https://doi.org/10.2307/2297501>
- K. Whitaker, J., & D. Nordhaus, W. (1970). *Invention, Growth and Welfare: A Theoretical Treatment of Technological Change*. *Economica*, 37, 443.  
<https://doi.org/10.2307/2551965>
- Kaldor, M., Sharp, M., & Walker, W. (1986). Industrial competitiveness and Britain's defence. *Lloyd's Bank Review*, 162, 31–49.
- Keller, W. (1997). *How trade patterns and technology flows affect productivity growth*, Working Paper num. 6990.
- Kellman, M. (1983). Relative Prices and International Competitiveness: An Empirical Investigation. *Empirical Economics*, 8, 125–138.  
<https://doi.org/10.1007/BF01969339>
- Kenessey, Z. (1987). The primary, secondary, tertiary and quaternary sectors of the economy. *Review of Income and Wealth*, 33, 359–385.  
<https://doi.org/10.1111/j.1475-4991.1987.tb00680.x>
- Kim, L., of Learned Societies, A. C., Institute, C. U. E. A., & Press, H. B. (1997). *Imitation to Innovation: The Dynamics of Korea's Technological Learning*. Harvard Business School Press.  
<https://books.google.com.ec/books?id=ey2ZoWyc2jQC>
- Kimberly, J. R., & Evanisko, M. J. (1981). Organizational Innovation: The Influence of Individual, Organizational, and Contextual Factors on Hospital Adoption of Technological and Administrative Innovations. *Academy of Management Journal*, 24(4), 689–713. <https://doi.org/10.5465/256170>
- Klepper, S., & M Cohen, W. (1996). A reprise of size and R&D. *Economic Journal*, 106, 925–951.  
<https://doi.org/10.2307/2235365>
- Lamberton, D. M. (1986). *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth* edited by Ralph Landau and Nathan Rosenberg (National Academy Press, Washington, D.C., 1986) pp. xiv + 640, \$35.00, ISBN 0-309-03630-5. *Prometheus*, 4(1), 214–219. <https://doi.org/10.1080/08109028608629601>
- Landau, R., & Rosenberg, N. (Eds.). (1986). *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth*. The National Academies Press.  
<https://doi.org/10.17226/612>
- Lane, P., & Lubatkin, M. (1998). Relative Absorptive Capacity and Inter-Organizational Learning. *Strategic Management Journal*, 19, 461–477.  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199805\)19:5<461::AID-SMJ953>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199805)19:5<461::AID-SMJ953>3.0.CO;2-L)
- Lenox, M., & King, A. (2004). Prospects for Developing Absorptive Capacity through Internal Information Provision. *Strategic Management Journal*, 25, 331–345. <https://doi.org/10.1002/smj.379>
- Lileeva, A., & Trefler, D. (2010). Improved Access to Foreign Markets Raises Plant-level Productivity...For Some Plants\*. *The Quarterly Journal of Economics*, 125(3), 1051–1099.  
<https://doi.org/10.1162/qjec.2010.125.3.1051>
- Liu, X., Hodgkinson, I., & Chuang, F. (2013). Foreign competition, domestic knowledge base and innovation activities: Evidence from Chinese high-tech industries. *Research Policy*, 43.  
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.11.005>
- Llanes, G., & Stefano, T. (2010). Patent policy, patent pools, and the accumulation of claims in sequential innovation. *Econ Theory*, 703–725.
- Lucas, R. (1989). *On The Mechanics Of Economic*

- Development. *Journal of Monetary Economics*, 22, 3–42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- Lugones, G., Suárez, D., & Gregorini, S. (2019). *DOCUMENTOS DE TRABAJO LA INNOVACIÓN COMO FÓRMULA PARA MEJORAS COMPETITIVAS COMPATIBLES CON INCREMENTOS SALARIALES. EVIDENCIAS EN EL CASO ARGENTINO.*
- Lundvall, B.-Å. (2019). *Higher Education, Innovation and Economic Development.*
- M. Cohen, W., & Levinthal, D. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35, 128–152. <https://doi.org/10.2307/2393553>
- Mansfield, E. (1986). Patents and Innovation: An Empirical Study. *Management Science*, 32, 173–181. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.2.173>
- Mansfield, E., Schwartz, M., & Wagner, S. (1981). Imitation Costs and Patents: An Empirical Study. *Economic Journal*, 91, 907–918. <https://doi.org/10.2307/2232499>
- Maskus, K. (2000). Intellectual property rights and economic development. *Case Western Reserve Journal of International Law*, 32, 471–506.
- Merges, R., & R. Nelson, R. (1990). The Complex Economics of Patent Scope. *Columbia Law Review*, 90. <https://doi.org/10.2307/1122920>
- Metcalfe, S., & Miles, I. (2000). *Innovation Systems in the Service Economy: Measurement and Case Study Analysis* (Vol. 18). <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4425-8>
- Myers, S. C., & Majluf, N. S. (1984). Corporate financing and investment decisions when firms have information that investors do not have. *Journal of Financial Economics*, 13(2), 187–221. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-405X\(84\)90023-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-405X(84)90023-0)
- Nadiri, M. (1993). *Innovations and Technological Spillovers*. 4423.
- Naranjo-Valencia, J. C., Jiménez, D. J., & Sanz-Valle, R. (2012). ¿Es la cultura organizativa un determinante de la innovación en la empresa? *Cuadernos de Economía y Dirección de La Empresa*, 15(2), 63–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cede.2011.07.004>
- Narula, R., & Zanfei, A. (2003). Globalisation of Innovation The Role of Multinational Enterprises. In *DRUID, Copenhagen Business School, Department of Industrial Economics and Strategy/Aalborg University, Department of Business Studies, DRUID Working Papers*.
- Nelson, R. (1959). The Simple Economics of Basic Scientific Research. *Journal of Political Economy*, 67(3), 297–306. <https://doi.org/10.1086/258177>
- Nelson, R., & Phelps, E. (1965). *Investment in Humans, Technological Diffusion and Economic Growth* (Issue 189). <https://econpapers.repec.org/RePEc:cwl:cwldpp:189>
- Nobel, R., & Birkinshaw, J. (1998). Innovation in Multinational Corporations: Control and Communication Patterns in International R&D Operations. *Strategic Management Journal*, 19. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199805\)19:5<479::AID-SMJ954>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199805)19:5<479::AID-SMJ954>3.0.CO;2-U)
- Petersen, B., & Himmelberg, C. (1994). R & D and Internal Finance: A Panel Study of Small Firms in High-Tech Industries. *The Review of Economics and Statistics*, 76, 38–51. <https://doi.org/10.2307/2109824>
- Piga, C., & Vivarelli, M. (2004). Internal and External R&D: A Sample Selection Approach\*. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 66, 457–482. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2004.00089.x>
- Porter, M. (1990). The Competitive Advantage Of Nations. In *Harvard Business Review* (Vol. 68). <https://doi.org/10.1007/978-1-349-11336-1>
- Rai, R. K., & Jagannathan, S. (2012). *Do Business Method Patents Encourage Innovation?* (Boston College Intellectual Property & Technology Forum (Ed.)).
- Raspe, O. (2009). *The Regional Knowledge Economy; a Multilevel Perspective on Firm Performance and Localized Knowledge Externalities.*
- Rogers, E. (1962). *Diffusion of Innovations* (pp. 418–434). <https://doi.org/10.4324/9780203710753-35>
- Rogers, M. (2004). Networks, Firm Size and Innovation. *Small Business Economics*, 22, 141–153. <https://doi.org/10.1023/B:SBEJ.0000014451.99047.69>
- Rosenberg, N. (1972). Factors affecting the diffusion of technology. *Explorations in Economic History*, 10, 3–33. [https://doi.org/10.1016/0014-4983\(72\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0014-4983(72)90001-0)
- Rosenberg, N. (1984). Inside the Black Box: Technology and Economics. *Technology and Culture*, 25. <https://doi.org/10.2307/2596875>
- Savic, M., Lawton-Smith, H., & Bournakis, I. (2014). *The effect of external knowledge sources and their geography on innovation in Knowledge Intensive Business Services (KIBS) SMEs; some implications for de-industrialised regions in the UK.*
- Schumpeter, J. (1934). *The Theory of Economic Development: An Inquiry Into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle*. 55.
- Seru, A. (2007). Do Conglomerates Stifle Innovation? *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1674018>
- Spielkamp, A., & Rammer, C. (2009). Financing of innovations – thresholds and options. *Management & Marketing*, 4.
- Symeonidis, G. (1996). *Innovation, Firm Size and Market Structure*. 161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/603802238336>
- Tether, B. (1998). Small and Large Firms: Sources of Unequal Innovations? *Research Policy*, 27, 725–745. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(98\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(98)00079-1)
- Tether, B. S., & Tajar, A. (2008). Beyond industry–university links: Sourcing knowledge for innovation from consultants, private research organisations and the public science-base. *Research Policy*, 37(6), 1079–1095. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.04.003>
- Veugelers, R. (1996). Internal R&D Expenditures and External Technology Sourcing. *Research Policy*, 26, 303–315. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(97\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(97)00019-X)

Yeaple, S., Helpman, E., & J. Melitz, M. (2004). Export Versus FDI with Heterogeneous Firms. *American Economic Review*, 94, 300–316.  
<https://doi.org/10.1257/000282804322970814>

## BIOGRAFÍAS



**Danny Eduardo Pilamunga Shaca**, graduado como Ingeniero en Ciencias Económicas y Financieras de la Escuela Politécnica Nacional, nacido en la comunidad de Echaleche-Pilahuin el 03 de Enero de 1995. Domina cuatro idiomas, entre ellos el chino-mandarín y el kichwa. Actualmente trabaja en proyectos empresariales

independientes y se desempeña como analista de riesgos económicos y financieros en la Cooperativa de Ahorro y Crédito Mushuc Runa. ORCID: 0000-0001-5833-7026



**Grace Carolina Guevara-Rosero**, es Doctora en Economía por la Universidad Jean Monnet de Saint-Etienne de Francia. Obtuvo su Máster en Game Theory, Experimental Economics and Applied Econometrics en el 2012. Actualmente es docente del Departamento de Economía

Cuantitativa de la Escuela Politécnica Nacional. Ha colaborado en instituciones como la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología, entre otras. Sus áreas de investigación son la Economía Regional y Urbana, la Economía de la Innovación y Organización Industrial. ORCID: 0000-0001-7605-1443



# Evaluación de una Mezcla Empanizadora, con Inclusión de Almidón Modificado, para su Aplicación en Carnes

Bautista, Norma<sup>1</sup> ; Franco-Crespo, Christian<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Ambato, Campus Huachi, Ambato, Ecuador

**Resumen:** La industria de los alimentos se está enfocando en agregar ingredientes alternativos que puedan mejorar las características del producto, así como también cuidar la salud de los consumidores. La investigación tiene como objetivo evaluar una mezcla de empanizado con inclusión de almidón modificado de maíz para la aplicación en carnes de pollo, pescado y res. Tres tratamientos son formulados con variación de almidón modificado (10%, 20% y 30%). La metodología aplicada en este estudio considera un análisis sensorial, propiedades de color y textura, así como también la determinación del porcentaje de absorción de aceite. La mezcla con almidón modificado al 30% presenta los mejores resultados, dando como resultado menos pérdidas durante el proceso de fritura, mediante la evaluación de los atributos sensoriales del producto empanizado. La evaluación de las propiedades de color evidencia que la inclusión de almidón modificado no afecta grandemente en sus valores, generando así una coloración dorada en un rango de H° de  $66,46 \pm 3,11$  a  $59,65 \pm 1,83$ ; mientras que en la evaluación de las propiedades de textura, se produce una mejora en la dureza, cohesividad y masticabilidad. Finalmente, la cantidad de absorción de aceite en muestras con harina comercial (MC) presenta mayor absorción de aceite con un 14,83%, 17,72% y 22,54% para empanizados con carne de pollo, pescado y res respectivamente, mientras que el T3 con 30% de almidón modificado reduce la absorción de aceite con un valor de 11,01% para pollo, 15,32% en pescado y 16,16% en res empanizados.

**Palabras clave:** Absorción de aceite, Evaluación sensorial, Propiedades de color y textura.

## Evaluation of a Breeding Mixture, Including Modified Starch, for Application to Meat

**Abstract:** Food industry is focusing on adding alternative ingredients that can improve product characteristics as well as care for the health of consumers. The research proposes to evaluate a breeding mixture including modified corn starch for application in chicken, fish and beef meats. Three treatments are formulated with modified starch variation (10%, 20% and 30%). The methodology applied in this study considers a sensory analysis, color and texture properties, as well as the determination of oil absorption percentage. The mixture with 30% modified starch presents the highest score in the samples, resulting in less losses during the frying process, during the sensory evaluation attributes of the breaded product. The evaluation of the color properties shows that the inclusion of modified starch does not greatly affect its values, this generates a golden coloration in an H° range of  $66.46 \pm 3.11$  to  $59.65 \pm 1.83$ ; while in the evaluation of texture properties, there is an improvement in hardness, cohesiveness and chewiness. Finally, the quantity of oil absorption in samples with commercial flour (MC) presents a greater oil absorption with 14.83%, 17.72% and 22.54% for breaded chicken, fish and beef respectively, while T3 with 30% modified starch with a value of 11.01% for chicken, 15.32% for fish and 16.16% breaded beef.

**Keywords:** Oil absorption, Sensory evaluation, Color and texture properties.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los empanizadores son denominados productos de revestimiento que se aplican a productos que van a ser sometidos a fritura (Sahin & Gülün, 2009). Generalmente, este proceso de fritura se aplica por inmersión; siendo uno de los métodos de cocción que tiene mayor aceptabilidad, por el sabor y textura que tiene gran demanda por la sensación en el paladar de los consumidores. Sin embargo, este proceso tiene

como consecuencia riesgos en la salud por la cantidad de aceite absorbido durante el proceso de fritura, que puede variar en función de la estructura que se forma en el revestimiento (Montes, Millar, y Provoste, 2016).

Los empanizados son elaborados a base de harina de trigo, arroz y maíz, a los que pueden añadirse condimentos u otras inclusiones para proporcionar textura, sabor, color y apariencia luego de la fritura (Dávalos, 2016). La aplicación

\*franco.crespo.ec@gmail.com

Recibido: 20/02/2020

Aceptado: 22/09/2020

Publicado: 30/11/2020

10.33333/tp.vol46n2.06

CC BY 4.0

de los empanizados es amplia y se relaciona con la elaboración de alimentos procesados, listos para consumir, mejorando su aspecto, incrementado volumen del producto y generando una cobertura que brinda cualidades sensoriales, que potencia el sabor de diversas carnes. Por este motivo, la aplicación de empanizados es amplia en la industria de alimentos. Además, puede contemplar varios tipos de cobertura, como son: rebozados, empanizados en productos sometidos a preparación completa o incompleta, congelados, envasados y conservados de forma adecuada (Rado, 2018).

La formulación de empanizados es muy variada y conlleva la aplicación de aditivos como gomas (Berry, 1994), variación del tamaño de partículas de la mezcla (Yusof & Lloyd, 2003), adición de carrageninas (Candogan & Kolsarici, 2003a, 2003b) y la inclusión de almidones modificados (Sajilata & Singhal, 2005). En especial, la inclusión de almidones modificados en la preparación de empanizados se basa en las cualidades que de termo resistencia, encapsulación del sabor, desarrollo de textura en la mezcla, así como de reducir la absorción de aceite (Abbas, K. Khalil, & Meor Hussin, 2010). La cantidad de ingredientes que podrían contener en la mezcla, así como los procesos de cocción (temperatura, tiempo y calentamiento), podrían modificar la calidad de la corteza. Según Zhang, Yang, Ji, y Ma, (2014) últimamente han utilizado almidones como ingredientes de mejoradores de textura de la masa, reducción de contenido de aceite en alimentos fritos y rebozados.

Los almidones modificados son empleados en gran variedad de productos, estos al realizar una modificación permiten obtener características deseables (L. Plazas y J. Plazas, 2013). Así mismo, mejora la estructura crujiente de la corteza, mejorando las características de adhesión que genera entre la carne (sustrato) y la cobertura (empanizado) (Santos, Ramírez, y Solari, 2008).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

Para el desarrollo de la experimentación se utilizó lomo de aguja de res, pechuga de pollo y corvina rosada. Por otra parte, para la mezcla con la que se formuló el empanizado se emplearon harinas, condimentos, almidón de maíz y almidón modificado de maíz-PBP25-SF6450 y CMC de mercados locales del cantón Latacunga. Para el proceso de fritura se empleó aceite comercial, cuyos ingredientes son: aceite puro de soya, oleína de palma, ácido cítrico y antioxidantes BHT.

- Preparación de la mezcla de revestimiento

Los ingredientes fueron pesados en base a las formulaciones presentadas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Formulación de la mezcla empanizadora

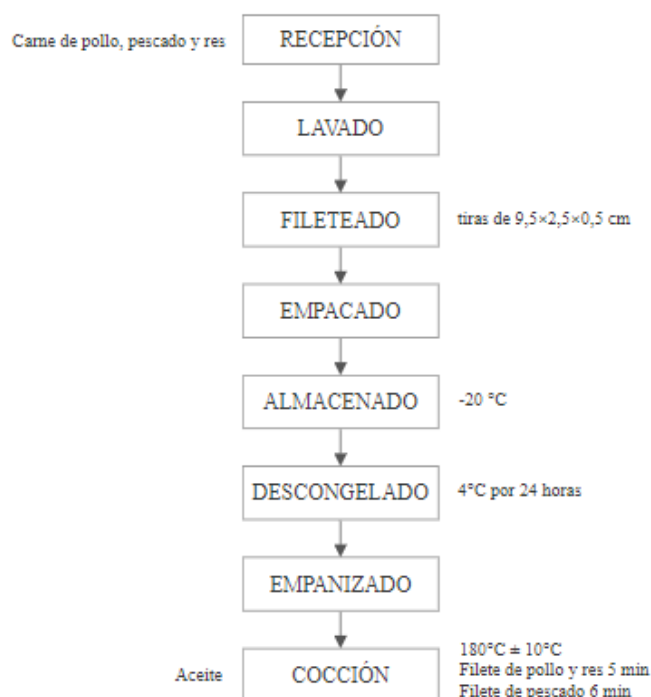
	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Almidón modificado de maíz	10	20	30
Almidón de maíz	35	25	15
Harina de maíz	20	20	20
Harina de arroz	25	25	25
Harina de trigo fortificada	10	10	10
Carboximetil celulosa	1	1	1
Condimentos	10,5	10,5	10,5
Sal	4	4	4

Fórmulas aplicadas para la evaluación de empanizados

En la Tabla 1, se presentan las formulaciones aplicadas en el presente estudio. En cada formulación se resalta que existe una variación de almidón modificado – AM entre el 10% y el 30% para cada tratamiento. Según el incremento de AM, disminuye la cantidad de almidón de maíz de cada formulación.

Para establecer el nivel de eficiencia de la aplicación de cada tratamiento, el estudio considera la incorporación de testigo, a partir de un empanizado de marca comercial, el cual no contiene almidón modificado en su composición. El proceso de aplicación de esta marca comercial – MC siguió el mismo proceso aplicado para cada tratamiento, así como fue sometida a los análisis sometidos a cada tratamiento.

### 2.2. Desarrollo del proceso de empanizados de carne pollo, pescado y res



**Figura 1.** Diagrama de flujo para la preparación de las muestras de empanizado en fritura

En la Figura 1, se presenta el proceso de recepción, aplicación del empanizado y cocción en aceite de cada tratamiento aplicado con la variación de la formulación de empanizado. En este proceso se mantienen constantes el tamaño de los trozos de carne, la temperatura de almacenamiento, el periodo de descongelación, así como la temperatura del aceite de 180°C.

### 2.3. Análisis sensorial

Para la evaluación sensorial se aplicó una escala hedónica de cinco puntos en base a lo señalado por Paniagua (2014), para lo cual se utilizó 20 catadores semi entrenados y una hoja de cata proporcionando a cada catador cuatro muestras aleatorias y codificadas. La escala hedónica para los parámetros de olor, sabor y aceptabilidad fue 1 (muy desagradable) y 5 (muy agradable), para el color fue 1 (muy pálido) y 5 (dorado intenso) y para la textura el 1 (suave) y 5 (muy crujiente).

### 2.4. Análisis instrumental de las muestras empanizadas

- Color de revestimiento

La medición de color se realizó en la parte superficial (revestimiento) de cada una de las muestras ya sometidas a fritura mediante un colorímetro Lovibond RM-200 previamente calibrado, realizando mediciones de los siguientes parámetros  $a^*$  (verde {-} a rojo {+}),  $b^*$  (azul {-} a amarillo {+}) y  $L^*$  ( $L^*=0$  para negro y  $L^*=100$  para blanco), cromaticidad ( $C^*$ ) y tono ( $H^\circ$ ) dichos valores fueron proporcionados por el equipo. Se realizaron 10 repeticiones de cada tratamiento (Panduro, 2015).

- Determinación de textura

El análisis de perfil de textura de las muestras observadas se analizó mediante el Texturómetro de Brookfield CT3, en base a la metodología propuesta por Das, Pawar, y Modi, (2013) y Khalil (2000). Los filetes de lomo de aguja de res, pechuga de pollo y corvina rosada previamente empanizados y fritos fueron enfriados a temperatura ambiente (12-14°C).

Las dimensiones de los filetes empanizados para el análisis comprendieron de 10 cm de largo, 3 cm de ancho y 1 cm de altura, el cual se aplicó una doble compresión hasta el 50% de la altura original, a una velocidad de cruceta de 2 mm/s, además se empleó la sonda TA7 del elemento TA-BT-KIT. Los parámetros que se midieron fueron dureza, adhesividad, fracturabilidad, cohesividad y masticabilidad.

- Determinación de humedad en corteza frita

La determinación de humedad contempló el método oficial, AOAC (1990) mediante el cual se tomaron muestras de recubrimiento del sustrato inmediatamente después de freír cada uno de los tratamientos. Para ello se pesaron de 5 a 6 g de muestra, para posteriormente llevar a una estufa a 105°C hasta conseguir un peso constante. El proceso se realizó por triplicado y se calculó el porcentaje de humedad mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{p_1 - p_2}{p_m} * 100 \quad (1)$$

Donde:

$p_1$  = Peso de la cápsula + muestra antes de secar en g.  
 $p_2$  = Peso de la cápsula + muestra después del secado en g.  
 $p_m$  = Peso de muestra en g.

- Absorción de aceite

El uso o absorción de aceite luego del proceso de fritura se determinó mediante lo señalado por Das, Pawar, y Modi, (2013) tomando el peso del aceite antes y después del proceso de freír. Para lo cual se realizó por triplicado, procediendo a calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Absorción de aceite (\%)} = \frac{W_1 \times W_2}{W_3} * 100 \quad (2)$$

Donde:

$W_1$  = Peso del aceite antes de freír.  
 $W_2$  = Peso del aceite después de freír.  
 $W_3$  = Peso del sustrato crudo rebozado.

### 2.5. Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental aplicado fue el diseño completamente aleatorizado con un solo factor, siendo este la concentración de almidón modificado. El análisis estadístico se realizó en el programa STATGRAPHICS Centurion XVI para el análisis de varianza ANOVA de una vía. Para la comparación de los tratamientos se realizó mediante la prueba Tukey, con un nivel de significancia de  $P \leq 0,05$ .

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Análisis sensorial

Mediante el análisis sensorial se puede dar a conocer la aceptación o rechazo de un producto, dado que permite evocar, medir, analizar, e interpretar reacciones de las características de los alimentos lo cual son percibidos por los sentidos (Severiano, 2010).

**Tabla 2.** Resultados promedio del análisis sensorial

Tratamiento	Tipo de empanizado	Atributos sensoriales	
		Textura	Aceptabilidad
M.C	Pollo	4,10±0,91	4,20±0,70
	Pescado	4,30±0,80	3,90±0,91
	Res	4,40±0,50	4,10±0,64
T1	Pollo	3,35±0,81	3,45±0,76
	Pescado	3,65±0,81	3,60±0,60
	Res	3,75±0,91	3,50±0,83
T2	Pollo	3,60±0,82	3,55±0,69
	Pescado	3,50±1,10	3,55±0,69
	Res	3,40±0,68	3,50±0,69
T3	Pollo	3,80±0,77	4,00±0,86
	Pescado	3,95±0,94	3,75±1,12
	Res	4,10±0,91	3,65±0,59

$\bar{x} \pm$  desviación respecto a 20 catadores. M.C (marca comercial), T1 (10% de almidón modificado), T2 (20% de almidón modificado), T3 (30% de almidón modificado).

Por una parte, en la Tabla 2, se presentan los resultados del análisis sensorial, para los parámetros de Textura y Aceptabilidad. En esta tabla se observa que existe una relación significativa de las muestras de T2, en relación con MC y T1 y T3. De acuerdo al análisis efectuado, se puede considerar comparativamente que aquella mezcla compuesta con un 20%

de almidón modificado posee mejores características, según la evaluación sensorial.

Por otra parte, en las Figuras 2, 3 y 4 los resultados evidencian una variación de color comprendida entre una escala hedónica cercano al “dorado” y “dorado intenso”. En cuanto al olor y sabor existe una mayor puntuación para los empanizados con harina comercial con una escala hedónica de “agradable”. Mientras que para el atributo textura existe una preferencia en el T3 con una escala hedónica de “crujiente” seguido de los empanizados con harina comercial, mejorando este atributo al incrementar su concentración.

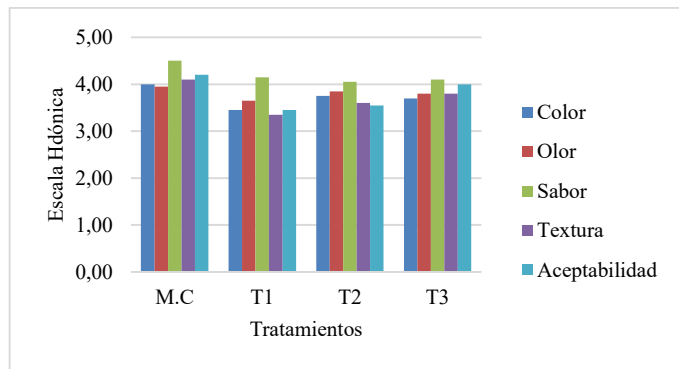


Figura 2. Valoración hedónica de los empanizados con filetes de pechuga de pollo a diferentes concentraciones de almidón modificado. MC = marca comercial, T = Tratamiento.

En el análisis de Nuggets de pollo frito su textura varió de 3,5 a 4,5 en su escala hedónica al adicionar 10 % de almidón modificado de maíz con alto contenido de amilosa, siendo este aceptable por los panelistas (Vongsawasdi, 2014). Finalmente se puede observar que el mejor tratamiento corresponde al T3 para los tres tipos de carne, lo cual evidencia que la variación de concentraciones interfiere en el mejoramiento de sus atributos, logrando alcanzar una mezcla en la cual genere aceptación entre los tratamientos MC y T3.

Según Agromeat (2011), la utilización de almidones modificados principalmente son empleados en productos cárnicos primordialmente de pollo a fin de incrementar altos rendimientos, mejoramiento en la textura y la palatabilidad del producto.

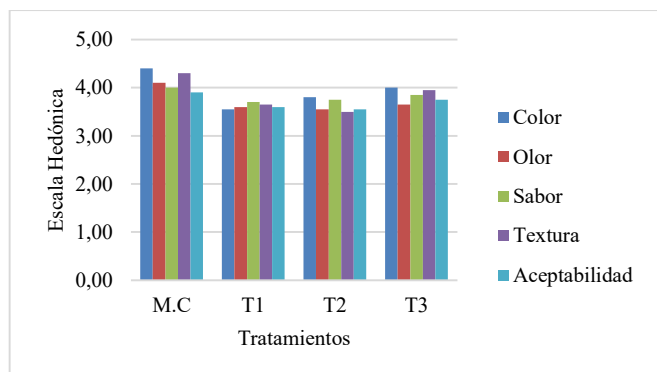


Figura 3. Valoración hedónica de los empanizados con filetes de corvina rosada a diferentes concentraciones de almidón modificado.

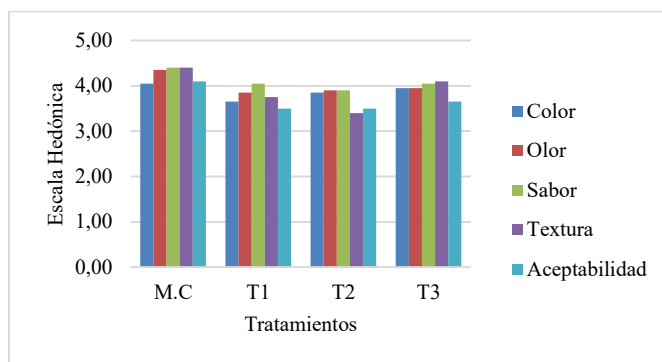


Figura 4. Valoración hedónica de los empanizados con filetes de lomo de aguja de res a diferentes concentraciones de almidón modificado.

### 3.2. Análisis instrumental de los empanizados

#### • Color

En las Tablas 3, 4 y 5 se muestran los resultados de los parámetros de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  y  $H^\circ$ ) de las muestras empanizadas de pollo, pescado y res respectivamente. Los resultados muestran que los tratamientos formulados presentaron coloraciones más claras; es decir con mayor luminosidad, dando como resultado una coloración menos dorada. En cuanto al parámetro  $a^*$  se evidencian valores menores en las muestras con carne de res, lo cual podría ser una producción menor de la reacción de Maillard (Bengtson, Cundiff, y Flick, 2006). Con respecto a cromaticidad ( $C^*$ ) y tono ( $H^\circ$ ) presentan resultados similares con estudios realizados por Albert, Salvador, Hough, y Fiszman, (2014), quienes señalan que las cortezas fritas de Nuggets obtuvieron valores de 32,5 y 67,5 respectivamente, resultando un color más amarillo y menos saturado, generando una coloración marrón dorado en la evaluación sensorial.

Tabla 3. Parámetros de color:  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$ ,  $H^\circ$  de las muestras empanizadas con pollo.

T	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$H^\circ$
M.C	46,07 ± 2,97 <sup>a</sup>	16,16 ± 1,07 <sup>a</sup>	32,8 ± 1,51 <sup>a</sup>	36,59 ± 1,35 <sup>a</sup>	63,76 ± 1,97 <sup>a</sup>
T1	52,32 ± 3,50 <sup>c</sup>	13,57 ± 1,65 <sup>b</sup>	28,48 ± 3,79 <sup>bc</sup>	31,63 ± 3,38 <sup>bc</sup>	64,28 ± 4,17 <sup>a</sup>
T2	48,52 ± 2,41 <sup>ab</sup>	11,72 ± 1,76 <sup>c</sup>	26,56 ± 1,55 <sup>c</sup>	29,01 ± 1,88 <sup>c</sup>	66,46 ± 3,11 <sup>a</sup>
T3	50,57 ± 2,39 <sup>bc</sup>	15,29 ± 1,29 <sup>ab</sup>	30,20 ± 3,05 <sup>ab</sup>	33,88 ± 2,92 <sup>ab</sup>	63,05 ± 2,64 <sup>a</sup>

Tratamientos = T, Luminosidad =  $L^*$ , +rojo =  $a^*$ , Cromaticidad =  $C^*$ , Ángulo hue =  $H^\circ$

Tabla 4. Parámetros de color:  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$ ,  $H^\circ$  de las muestras empanizadas con pescado.

T	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$H^\circ$
M.C	37,25 ± 3,43 <sup>a</sup>	13,63 ± 1,53 <sup>a</sup>	21,32 ± 2,68 <sup>b</sup>	25,31 ± 2,85 <sup>a</sup>	57,39 ± 2,52 <sup>a</sup>
T1	44,13 ± 3,63 <sup>b</sup>	11,20 ± 0,96 <sup>b</sup>	24,71 ± 3,45 <sup>a</sup>	27,15 ± 3,35 <sup>a</sup>	65,36 ± 2,74 <sup>b</sup>
T2	40,50 ± 3,20 <sup>ab</sup>	11,02 ± 1,68 <sup>b</sup>	22,58 ± 1,55 <sup>ab</sup>	25,16 ± 1,97 <sup>a</sup>	64,10 ± 2,71 <sup>b</sup>
T3	40,22 ± 3,23 <sup>ab</sup>	11,26 ± 1,14 <sup>b</sup>	23,51 ± 2,27 <sup>ab</sup>	26,11 ± 2,12 <sup>a</sup>	64,33 ± 3,05 <sup>b</sup>

M.C (marca comercial), T1 (10% de almidón modificado), T2 (20% de almidón modificado), T3 (30% de almidón modificado). Los superíndices diferentes indican diferencias significativas, al 95% de confianza evaluada con una prueba Tukey.

**Tabla 5.** Parámetros de color: L\*, a\*, b\*, C\*, H° de las muestras empanizadas con res.

T	L*	a*	b*	C*	H°
M.C	37,25 ± 3,43 <sup>a</sup>	13,63 ± 1,53 <sup>a</sup>	21,32 ± 2,68 <sup>b</sup>	25,31 ± 2,85 <sup>a</sup>	57,39 ± 2,52 <sup>a</sup>
T1	44,13 ± 3,63 <sup>b</sup>	11,20 ± 0,96 <sup>b</sup>	24,71 ± 3,45 <sup>a</sup>	27,15 ± 3,35 <sup>a</sup>	65,36 ± 2,74 <sup>b</sup>
T2	40,50 ± 3,20 <sup>ab</sup>	11,02 ± 1,68 <sup>b</sup>	22,58 ± 1,55 <sup>ab</sup>	25,16 ± 1,97 <sup>a</sup>	64,10 ± 2,71 <sup>b</sup>
T3	40,22 ± 3,23 <sup>ab</sup>	11,26 ± 1,14 <sup>b</sup>	23,51 ± 2,27 <sup>ab</sup>	26,11 ± 2,12 <sup>a</sup>	64,33 ± 3,05 <sup>b</sup>

M.C (marca comercial), T1 (10% de almidón modificado), T2 (20% de almidón modificado), T3 (30% de almidón modificado). Los superíndices diferentes indican diferencias significativas, al 95% de confianza evaluada con una prueba Tukey.

### 3.3. Análisis de perfil de textura

Los valores de perfil de textura para los empanizados se muestran en la Tabla 6. La dureza en el T3 alcanza un valor similar al tratamiento con harina comercial; mientras que el T1 tiene un valor muy elevado. Según Prestes et al., (2014) al presentar una mayor dureza, presentan una menor humedad en el producto por ende requiere de más energía para la masticación.

Los tres tipos de carne plantean que en el T1 se requiere de más energía y fuerza para la masticación, lo cual podría ser efecto de una carne con mayor cantidad de pérdida de agua. Inclusive, sensorialmente este tratamiento no fue muy aceptable para los catadores. Ziobro, Korus, Witczak, y Juszczak, (2012); Barbut, (2018) señalan que el reemplazo parcial de almidón nativo por almidón modificado influye principalmente en la disminución de la dureza, masticabilidad y gomosidad. Es decir, esto se genera por interacciones de las proteínas de la carne juntamente con el almidón modificado, generando al producto más digerible y aceptable. En cuanto al T3 se podría señalar que existe un equilibrio, dado que se asemeja a la crujencia obtenida en las muestras con harina

Determinación de humedad de la corteza y absorción de aceite  
Las muestras con adición de almidón modificado obtuvieron una mayor humedad en la corteza, lo cual podría ser efecto de una absorción menor de aceite en comparación con las cortezas de la harina comercial (Tabla 8).

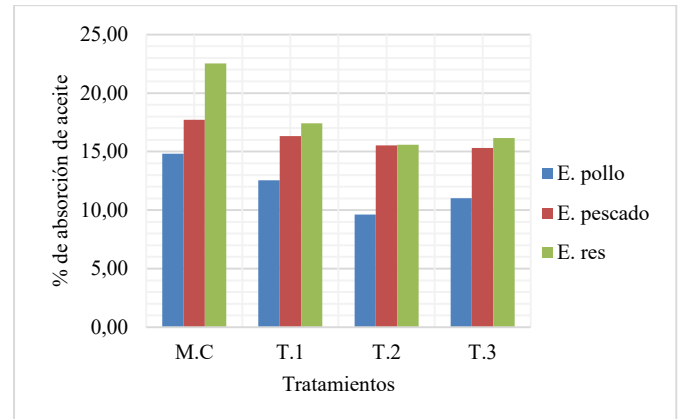
**Tabla 6.** Humedad en la corteza de los empanizados

	TIPO DE CORTEZA DE EMPANIZADO		
	Pollo	Pescado	Res
M.C	8,32 ± 0,92 <sup>a</sup>	13,31 ± 7,51 <sup>a</sup>	8,30 ± 2,84 <sup>a</sup>
T1	7,97 ± 0,29 <sup>a</sup>	18,76 ± 4,40 <sup>a</sup>	7,95 ± 2,27 <sup>a</sup>
T2	9,63 ± 2,61 <sup>a</sup>	19,38 ± 3,37 <sup>a</sup>	7,49 ± 3,98 <sup>a</sup>
T3	10,55 ± 3,03 <sup>a</sup>	16,87 ± 1,16 <sup>a</sup>	8,34 ± 1,57 <sup>a</sup>

M.C (marca comercial), T1 (10% de almidón modificado), T2 (20% de almidón modificado), T3 (30% de almidón modificado). Los superíndices diferentes indican diferencias significativas, al 95% de confianza evaluada con una prueba Tukey.

Los almidones modificados han sido utilizados para disminuir el contenido de aceite de los alimentos fritos y rebozados, debido al alto contenido de amilosa de los gránulos de almidón, proporcionando una mejor barrera dando como efecto que el aceite no penetre al sustrato; el contenido de

aceite es importante ya que disminuye la vida útil a través del proceso de oxidación (Zhang et al., 2014).

**Figura 5.** Porcentaje de absorción de aceite en diferentes tipos de carne y concentración de almidón modificado

La utilización de almidones modificados tiene la ventaja de formar una película perfecta para el sustrato, evitando así una pérdida de humedad y la reducción de absorción de aceite. Además, puede usarse para mejorar aún más la adhesión en batters y al desarrollo de una textura crujiente en productos rebozados o empanizados.

**Tabla 7.** Porcentaje de absorción de aceite

Tratamiento	Tipo de empanizado		
	Pollo	Pescado	Res
M.C	14,83 ± 0,50 <sup>b</sup>	17,72 ± 6,85 <sup>a</sup>	22,54 ± 2,63 <sup>b</sup>
T.1	12,55 ± 0,26 <sup>ab</sup>	16,32 ± 5,17 <sup>a</sup>	17,42 ± 0,47 <sup>ab</sup>
T.2	9,63 ± 1,68 <sup>a</sup>	15,53 ± 1,14 <sup>a</sup>	15,58 ± 3,23 <sup>a</sup>
T.3	11,01 ± 2,66 <sup>ab</sup>	15,32 ± 1,40 <sup>a</sup>	16,16 ± 1,58 <sup>a</sup>

M.C (marca comercial), T1 (10% de almidón modificado), T2 (20% de almidón modificado), T3 (30% de almidón modificado). Los superíndices diferentes indican diferencias significativas, al 95% de confianza evaluada con una prueba Tukey.

En la Tabla 7 se presentan los resultados, donde las muestras con harina comercial tuvieron mayor cantidad de absorción de aceite a diferencia de entre las muestras con almidón modificado de maíz. Las muestras con M.C obtuvieron un 14,83%, 17,72% y 22,54% para empanizados con carne de pollo, pescado y res respectivamente, mientras que el T3 con un valor de 11,01% para pollo, 15,32% en pescado y 16,16% res empanizados. Es decir, en relación con MC, para las tres carnes, T2 presenta una menor absorción de aceite, con una diferencia para T3 en el caso de las muestras evaluadas de pescado.

## 4. CONCLUSIONES

Este estudio tiene como objetivo analizar la adición de almidón modificado para la elaboración de empanizado, evaluado sobre tres muestras de carne (res, pescado, pollo). Los resultados demuestran que la inclusión de almidón modificado puede ser utilizada en una mezcla empanizadora, dado por las características obtenidas tras el proceso de fritura. Mediante la evaluación sensorial el tratamiento con 30% de almidón modificado presentó una mejor aceptación sensorial, seguido de las muestras con harina comercial, evidenciando

principalmente en la textura un mejoramiento al incrementar su concentración, obteniendo así una corteza crujiente.

Las propiedades de color mostraron cierta variación en un rango mínimo, dando valores altos en las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  con un  $H^\circ$  comprendidas entre  $66,46 \pm 3,11$  a  $59,65 \pm 1,83$  con una tendencia hacia el color dorado característico de los alimentos fritos. En cuanto a los parámetros de textura, estos revelaron que la cantidad de almidón mejora sus características, dado a que requiere de una fuerza y energía menor para la masticación a diferencia de la muestra con mayor cantidad de almidón nativo, lo cual podría ser por efecto de una mayor pérdida de agua y la formación de una corteza más dura, limitando así la utilización del almidón nativo en procesos de temperaturas altas. El porcentaje de humedad en la corteza no presentó alguna diferencia significativa en relación con la cantidad de almidón. Sin embargo redujo el porcentaje de absorción de aceite en los empanizados, lo cual podría ser efecto por la cantidad de amilosa que puede contener el almidón modificado creando una película que impide el ingreso del aceite.

## REFERENCIAS

- Abbas, K. A., K. Khalil, S., & Meor Hussin, A. S. (2010). Modified Starches and Their Usages in Selected Food Products: A Review Study. *Journal of Agricultural Science*, 2(2). <https://doi.org/10.5539/jas.v2n2p90>
- Agromeat. (2011). Utilizando almidones para maximizar rendimientos de procesamiento. <https://www.agromeat.com/41485/utilizando-almidones-para-maximizar-rendimientos-de-procesamiento>
- Albert, A., Salvador, A., Hough, G., & Fiszman, S. (2014). Influence of outer layer formulation on the sensory properties of microwaved breaded nuggets. *International Journal of Food Properties*, 17(4), 829–841. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.604892>
- AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 35 Choice Reviews Online § (1990). <https://doi.org/10.5860/choice.35-0912>
- Barbut, S. (2018). Effects of regular and modified potato and corn starches on frankfurter type products prepared with vegetable oil. *Italian Journal of Food Science*, 30(4), 801–808. <https://doi.org/10.14674/IJFS-1084>
- Bengtson, R., Cundiff, J. S., & Flick, G. J. (2006). The Effect of Novel Frying Methods on Quality of Breaded Fried Foods Master of Science The Effect of Novel Frying Methods on Quality of Breaded Fried Foods. *Systems Engineering*.
- Berry, B. W. (1994). Properties of Low-Fat, Nonbreaded Pork Nuggets with Added Gums and Modified Starches. *Journal of Food Science*, 59(4), 742–746. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb08117.x>
- Candogan, K., & Kolsarici, N. (2003a). Storage stability of low-fat beef frankfurters formulated with carrageenan or carrageenan with pectin. *Meat Science*, 64(2), 207–214. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00182-1](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00182-1)
- Candogan, K., & Kolsarici, N. (2003b). The effects of carrageenan and pectin on some quality characteristics of low-fat beef frankfurters. *Meat Science*, 64(2), 199–206. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00181-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00181-X)
- Das, R., Pawar, D. P., & Modi, V. K. (2013). Quality characteristics of battered and fried chicken: comparison of pressure frying and conventional frying, 50(April), 284–292. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0350-z>
- Dávalos, L. (2016). *Desarrollo de nuggets de bonito (Sarda chiliensis chiliensis) bajos en calorías y con la adición de chía (Salvia hispánica) como antioxidante*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Khalil, A. H. (2000). Quality characteristics of low-fat beef patties formulated with modified corn starch and water. *Food Chemistry*. 68. DOI: 10.1016/S0308-8146(99)00156-9
- Montes, N., Millar, I., & Provoste, R. (2016). Absorción de aceite en alimentos fritos. *Revista chilena de nutrición*, 43(1), 87-91. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000100013>
- Panduro, C. (2015). *Efecto de la sustitución de harina de trigo por harina de quinua (Chenopodium quinoa) sobre el contenido de proteína, color, firmeza y aceptabilidad general de nuggets de pollo*. (Tesis pregrado). Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.
- Paniagua, N. (2014). *Aplicación de harinas extrusionadas en la mejora de la calidad de rebozados*. (Trabajo maestría). Universidad de Valladolid, Palencia, España.
- Plazas, L., & Plazas, J. (2013). *Aplicación de minería de datos para la segmentación de clientes que comoran materias primas derivadas del maíz para la generación de estrategias de comunicación*. (Tesis pregrado). Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Prestes, R. C., Silva, L. B., Torri, A. M. P., Kubota, E. H., Rosa, C. S., Roman, S. S., ... Demiate, I. M. (2014). Sensory and physicochemical evaluation of low-fat chicken mortadella with added native and modified starches. *Journal of Food Science and Technology*, 52(7), 4360–4368. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1496-2>
- Rado, R. (2018). *Empanizados de filetes congelados de trucha arco iris (Oncorhynchus mykiss) sazonados y enriquecidos con quinua (Chenopodium quinoa)*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de San Agustín De Arequipa, Arequipa, Perú.

- Sahin, S., & Gülün, S. (2009). *Advances in deep-fat frying of foods*. Boca Raton: CRC Press.
- Sajilata, M. G., & Singhal, R. S. (2005). Specialty starches for snack foods. *Carbohydrate Polymers*, 59(2), 131–151. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.08.012>
- Santos, R. M., Ramírez, A., & Solari, A. (2008). Desarrollo de formulaciones de batido como alternativas a productos comerciales utilizados en el empanizado de porciones de calamar gigante. *Inst. tecnol. pesq.* 8, 57–64.
- Severiano, P. (2010). Manual de evaluación sensorial.
- Vongsawasdi, P. (2014). Using modified starch to decrease the oil absorption in fried battered chicken, (January 2008).
- Yusof, M., & Lloyd, W. (2003). Effect of Breeding Particle Size on Coating Adhesion in Breaded , Fried Chicken Breasts. *Coating*, 27(Scott 1987), 103–113.
- Zhang, L., Yang, M., Ji, H., & Ma, H. (2014). Some physicochemical properties of starches and their influence on color, texture, and oil content in crusts using a deep-fat-fried model. *CYTA - Journal of Food*, 12(4), 347–354. <https://doi.org/10.1080/19476337.2014.887148>
- Ziobro, R., Korus, J., Witczak, M., & Juszczak, L. (2012). Influence of modified starches on properties of gluten-free dough and bread. Part II: Quality and staling of gluten-free bread. *Food Hydrocolloids*, 29(1), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.02.009>

## BIOGRAFÍAS



**Norma Alexandra Bautista Muso**, nació el 15 de Agosto de 1994, en la provincia de Cotopaxi cantón Latacunga. En el año 2012, obtuvo el título de Bachiller Técnico Agropecuario: Especialización Explotaciones Agropecuarias otorgado por el Colegio “Simón Rodríguez”. En el año 2019, inició el proyecto de investigación bajo el tema “Evaluación de una mezcla empanizadora, con inclusión de almidón modificado, para su aplicación en carnes”, para la obtención del título de Ingeniera en Alimentos en la Universidad Técnica de Ambato. Actualmente, encamina en la creación de su propio emprendimiento en la industria láctea. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2683-5730>



**Christian Franco Crespo**, Doctor en Economía Agraria, por la Universidad Politécnica de Madrid. Quiteño y actualmente cumple funciones como Docente Investigador en la Universidad Técnica de Ambato. Se ha desempeñado como coordinador de proyectos de investigación, conferencista y editor de revistas científicas. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4818-4350>





## Preparación de Artículos para la Revista Politécnica Utilizar Mayúsculas en cada Palabra en el Caso del Título

---

**Resumen:** Las siguientes instrucciones establecen las pautas para la preparación de artículos para la Revista Politécnica. Los artículos pueden ser escritos en español o en inglés, pero tendrán un resumen de máximo 250 palabras en los dos idiomas. Los autores pueden hacer uso de este documento como una plantilla para componer su artículo si están utilizando Microsoft Word 2013 o superior. Caso contrario, este documento puede ser utilizado como una guía de instrucciones. El número mínimo de páginas será 6 y el máximo 15, Para el envío de los artículos, los autores deben seguir las instrucciones colocadas en el sistema de recepción de artículos del sitio web de la Revista Politécnica ([revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)). En caso de que su artículo sea en inglés colocar el título y el resumen en los dos idiomas.

**Palabras clave:** Incluir una lista de 3 a 6 palabras.

### Title of Manuscript

**Abstract:** These instructions give you guidelines for preparing papers for EPN Journal. Papers can be written in Spanish or English; however, an abstract of maximum 250 words and written in both languages is required. Use this document as a template to compose your paper if you are using Microsoft Word2013 or later. Otherwise, use this document as an instruction set. The minimum number of pages will be 6 and the maximum will be 15. For submission guidelines, follow instructions on paper submission system from the EPN Journal website([revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)).

**Keywords:** Include a list of 3 to 6 words.

---

#### 1. SECCIÓN I

Este documento es una plantilla para versiones Microsoft Word 2013 o posteriores. Si está leyendo una versión impresa de este documento, por favor descargue el archivo electrónico, **revistapolitecnicaformato2020.docx**. En caso de que el autor desee enviar el artículo en formato LaTeX por favor comunicarse con la coordinación de edición ([epnjournal@epn.edu.ec](mailto:epnjournal@epn.edu.ec)). *Por favor, no coloque numeración ni pie de página en el documento presentado.*

**No cambie los tamaños de fuente o espaciado de renglones para ajustar el texto a un número limitado de páginas.** Utilice cursiva o negrita para dar énfasis a un texto, no subrayado.

#### 2. SECCIÓN II

Para las pautas de presentación, siga las instrucciones emitidas por el sistema del sitio web de la revista de la EPN.

La presentación inicial debe tomar en cuenta todas las indicaciones que se presentan en la plantilla, para de esta

manera tener una buena estimación de la longitud del artículo a publicarse. Además, de esta manera el esfuerzo necesario para la presentación final del manuscrito será mínimo.

Como sugerencia, es importante tomar en cuenta que, el primer autor es el investigador que hizo la mayor parte del trabajo, mientras que el último autor suele ser el profesor quien es el líder intelectual y, a menudo edita y presenta el borrador final del documento.

La Revista Politécnica pondrá en marcha un sistema de transferencia electrónica de derechos de autor en su momento. Por favor, "no" enviar formularios de derecho de autor por correo o fax. A continuación se detallan las consideraciones que se deben tener en cuenta para la presentación final del artículo.

#### 3. SECCIÓN III

##### 3.1 Figuras, tablas y márgenes

Todas las figuras deben ser incorporadas en el documento. Al incluir la imagen, asegúrese de insertar la actual en lugar de un

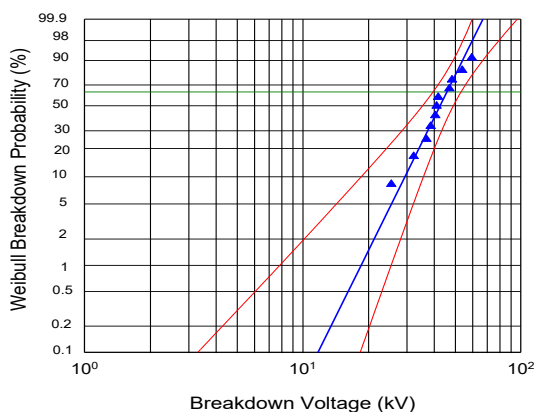
enlace a su equipo local. Los archivos de: figuras, dibujos, fotografías, etc., deberán enviarse en formato png, con al menos 1200 puntos (resolución) en uno de sus ejes, con leyendas legibles y de tamaño adecuado. El artículo debe contener entre tablas y figuras un máximo de 10.

Las etiquetas de los ejes de las figuras son a menudo una fuente de confusión. Utilice las palabras en lugar de símbolos. Por ejemplo, escriba la cantidad "Magnetización," o "Magnetización M" no sólo "M".

Las figuras y tablas deben estar en la parte superior e inferior de las columnas. Evite colocarlas en medio de ellas. Las figuras y tablas grandes pueden extenderse a lo largo de ambas columnas. Las leyendas de las figuras deben estar centradas debajo de las figuras, los títulos de las tablas deben estar centrados sobre ellas. Evite colocar figuras y tablas antes de su primera mención en el texto. Para la mención de figuras, tablas o ecuaciones utilice las palabras completas con la primera letra en mayúscula, por ejemplo "Figura 1".

Coloque las unidades entre paréntesis. No etiquete los ejes sólo con unidades. Por ejemplo, escriba "Magnetización (A/m)" o "Magnetización (Am<sup>-1</sup>)", no sólo "Magnetización A/m." No etiquete los ejes con una relación de cantidades y unidades. Por ejemplo, escriba "Temperatura (K)", no "Temperatura K".

Los multiplicadores pueden ser especialmente confusos. Escriba "Magnetización (kA/m)" o "Magnetización (103A/m)". No escriba "Magnetización (A/m) x 1000" porque el lector no sabrá si la etiqueta del eje de arriba significa 16000 A/m o 0,016 A/m. Las etiquetas de las figuras deben ser legibles, con un valor de 8 y sin espacio de separación con la figura.



**Figura 1.** Distribución Weibull de 60 Hz voltajes de ruptura.  $\alpha = 45,9$  kV  $\text{pico}\beta = 5,08$ . Intervalo de Confidencia 95%

Los autores deben trabajar activamente con los márgenes solicitados. Los documentos de la revista serán marcados con los datos del registro de la revista y paginados para su inclusión en la edición final. Si la sangría de los márgenes en su manuscrito no es correcta, se le pedirá que lo vuelva a presentar y esto, podría retrasar la preparación final durante el proceso de edición.

Por favor, no modificar los márgenes de esta plantilla. Si está

creando un documento por su cuenta, considere los márgenes que se enumeran en la Tabla 1. Todas las medidas están en centímetros.

**Tabla 1.** Márgenes de página

Página	Superior	Inferior	Izquierda/ Derecha
Primera	2,0	2,5	1,5
Resto	2,0	2,5	1,5

### 3.2 Ecuaciones

Si está usando MSWord, sugerimos utilizar el *Editor de ecuaciones de Microsoft* o el *MathType* add-on para las ecuaciones en su documento (*Insertar/Objeto/Crear Nuevo/Microsoft Ecuación o Ecuación MathType*). La opción "flotar sobre el texto" no se debe elegir.

Enumere las ecuaciones consecutivamente con los números de la ecuación en paréntesis contra el margen derecho, como en (1). Utilice el editor de ecuaciones para crear la ecuación y esta debe estar localizada en el margen derecho, como se muestra en el ejemplo siguiente:

$$\int_0^{r_2} F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \quad (1)$$

Asegúrese de que los símbolos en su ecuación han sido definidos antes de que aparezcan en la ecuación o inmediatamente después. Ponga en cursiva los símbolos (T podría referirse a la temperatura, pero T es la unidad tesla). Para referirse a la ecuación se escribe por ejemplo "Ecuación (1) "

### 3.3 Unidades

Utilice el SI como unidades primarias. Otras unidades pueden ser utilizadas como unidades secundarias (en paréntesis). Por ejemplo, escriba "15 Gb/cm<sup>2</sup> (100 Gb/in<sup>2</sup>)". Evite combinar las unidades del SI y CGS, como la corriente en amperios y el campo magnético en oerstedios. Esto a menudo lleva a confusión porque las ecuaciones no cuadran dimensionalmente. Si tiene que usar unidades mixtas, aclare las unidades para cada cantidad en una ecuación.

Por ejemplo, en el SI la unidad de fuerza de campo magnético Hes A/m. Sin embargo, si desea utilizar unidades de T, o bien se refiere a la densidad de flujo magnético B o la fuerza del campo magnético simbolizadas como  $\mu_0 H$ . Use un punto en el centro para separar las unidades compuestas, por ejemplo, "A·m<sup>2</sup>."

### 3.4 Abreviaturas y Siglas

Defina las abreviaciones y acrónimos la primera vez que se utilizan en el texto, incluso después de que ya han sido definidos en el resumen. No utilice abreviaturas en el título a menos que sea inevitable.

### 3.5 Otras recomendaciones

- Para expresar valores decimales se usarán comas, por ejemplo 3,45. Use un cero antes del decimal.
- Se incluirá un espacio entre números para indicar los valores de miles, por ejemplo 463 690.
- Utilice notación científica para expresar números con más de 3 cifras hacia la derecha o izquierda, es decir, mayores a 2,50E+05 o menores a 4,8E-03.
- Finalmente, de ser necesario y de manera opcional, se pueden incluir conclusiones, recomendaciones y agradecimiento.

## REFERENCIAS

La lista de referencias debe estar en Formato APA ordenada alfabéticamente de acuerdo con el apellido del primer autor del artículo. El agregado et al no debe ir en cursiva. Por favor nótese que todas las referencias listadas aquí deben estar directamente citadas en el cuerpo del texto usando (Apellido, año). Las notas al pie deben evitarse en la medida de lo posible.

El artículo debe contener un mínimo de 6 referencias.

Seguir el formato indicado a continuación de acuerdo al tipo de referencia a:

### Formato básico para referenciar libros:

Apellido, Inicial Nombre. (Año). *Título del libro*. Ciudad, País: Editorial.

- **Libros con un autor:**

En las referencias:

King, M. (2000). *Wrestling with the angel: A life of Janet Frame*. Auckland, New Zealand: Viking.

Cita en el texto:

(King, 2000) o King (2000) argumenta que ...

- **Libros con dos autores:**

En las referencias:

Treviño, L. K., y Nelson, K. A. (2007). *Managing business ethics: Straight talk about how to do it right*. Hoboken, NJ: Wiley

Cita en el texto:

(Treviño y Nelson, 2007) o Treviño y Nelson (2007) ilustran...

- **Libros con dos o más autores:**

En las referencias:

Krause, K.-L., Bochner, S., y Duchesne, S. (2006). *Educational psychology for learning and teaching* (2nd ed.). South Melbourne, VIC., Australia: Thomson.

Cita en el texto:

De acuerdo con Mezey et al. (2002) o ... (Mezey et al., 2002).

### Formato básico para referenciar artículos científicos

Apellido, Inicial Nombre. (Año). Título del Artículo. *Título/Iniciales de la Revista*. Número de Volumen (Tomo), páginas

- **Artículos en revistas:**

En las referencias:

Sainaghi, R. (2008). Strategic position and performance of winter destinations. *TourismReview*, 63(4), 40-57.

Cita en el texto:

(Sainaghi, 2008) o Sainaghi (2008) sugiere ...

- **Artículos con DOI**

En las referencias:

Shepherd, R., Barnett, J., Cooper, H., Coyle, A., Moran-Ellis, J., Senior, V., & Walton, C. (2007). Towards an understanding of British public attitudes concerning human cloning. *Social Science & Medicine*, 65(2), 377-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.03.018>

Cita en el texto:

Shepherd et al. (2007) o Shepherd et al. (2007) resaltan la...

- **Artículos sin DOI**

En las referencias:

Harrison, B., & Papa, R. (2005). The development of an indigenous knowledge program in a New Zealand Maori-language immersion school. *Anthropology and Education Quarterly*, 36(1), 57-72. Obtenido de la base de datos AcademicResearch Library

Cita en el texto:

(Harrison y Papa, 2005) o En su investigación, Harrison y Papa (2005) establecieron...

- **Artículos en línea**

En las referencias:

Snell, D., & Hodgetts, D. (n.d.). The psychology of heavy metal communities and white supremacy. *Te Kura Kete Aronui*, 1. Obtenido de: <http://www.waikato.ac.nz/wfass/tkka>. (Mayo, 2015).

Cita en el texto:

(Snell y Hodgetts, n.d.) o Snell y Hodgetts (n.d.) identificaron "..."

## INDEXACIONES



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





ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



**EPN**  
*editorial*

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





ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



**EPN**  
*editorial*

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