



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

# REVISTA. Ingeniería

Volumen 26 • Número 3 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

# 2021

# REVISTA Ingeniería

Volumen 26 · Número 3 · Año 2021 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

## REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

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

## POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

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

## EDITOR

**Nelson L. Díaz, PhD.**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

## COMITÉ EDITORIAL

**Sarah Greenfield, PhD.**  
Faculty of Technology of  
Monfort University,  
Reino Unido

**Alonso Salvador Sanchez, PhD.**  
Universidad de Alcalá,  
España

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

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

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

**Josep M. Guerrero, PhD.**  
Aalborg University, Dinamarca

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

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

**Carlos Eduardo Moreno, PhD.**  
Universidad Nacional de  
Colombia

**Víctor Hugo Grisales, PhD.**  
Universidad Nacional de  
Colombia

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

## COMITÉ CIENTÍFICO

**Germán Jairo Hernández, PhD.**  
Universidad Nacional  
de Colombia

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

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

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

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

**Francisco Santamaría Piedrahita, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

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

## DIRECTIVAS

**Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.**  
Rector

**Ángela Parrado Rosselli, PhD.**  
Directora Centro de Investigación  
y Desarrollo Científico

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

## PREPARACIÓN EDITORIAL

**Fabian Ríos Gutierrez, MSc.**  
Gestor Editorial

**Pablo Estrada Suarez**  
Corrección de Estilo

**José Daniel Gutierrez Mendoza**  
Corrección de Estilo

**Julian Arcila-Forero, MSc.**  
Diseñador *LaTeX*

## PERMISO DE REPRODUCCIÓN

### Open access



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

Atribución - No Comercial - Compartir igual.

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

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

## COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

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

## INDIZADA EN





## ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

**Oscar Díaz Becerra**

Pontificia Universidad Católica del Perú

**Gisela Montero**

Universidad Autónoma de Baja California

**Ramon Sanchez-Iborra**

Universidad de Murcia

**Danny Munera**

Universidad de Antioquia

**F. J. Pérez-Invernón**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

**Carlos Franco**

Universidad del Rosario

**Juan Carlos Figueroa García**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Nelson Enrique Vera Parra**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Hans López**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Rosario García Giménez**

Universidad Autónoma de Madrid

**Carlos Hoffmann Sampaio**

Universitat Politècnica de Catalunya

**Bertha Mazon-Olivo**

Universidad Técnica de Machala

**Mirna Guevara**

Instituto de Energías Renovables de la UNAM

**Irene Carrillo**

European Research Network on Second Victims (COST Action CA) Universidad Nacional Autónoma de México

**Juan Pablo Ramirez-Paredes**

Universidad de Guanajuato

**Guillermo Gutiérrez-Alcaraz**

Instituto Tecnológico de Morelia

**Carlos Díaz-Caro**

Universidad de Extremadura

**Guillermo Hernández**

AIR Institute

**Fernando Cruz Aranda**

Universidad Panamericana

**Marcos A. Coronado**

Universidad Autónoma de Baja California

**José L. Arciniegas**

Universidad del Cauca

**Eduard Llobet**

Universitat Rovira i Virgili

**N. Novas**

Universidad de Almería

**Diana Carolina Guzmán Cortés**

Pontificia Universidad Javeriana

**Victor Angülo**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Gustavo Puerto**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Holman Ospina-Mateus**

Universidad Tecnológica de Bolívar

**Juan Serrano-Arellano**

Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

**José Manuel Gómez-Soberón**

Universitat Politècnica de Catalunya

**Guillermo Martínez-Flórez**

Universidad de Córdoba

**Humberto Estay Cuenca**

Advanced Mining Technology Center

**Ricardo Torres Torres-Jardín**

Universidad Nacional Autónoma de México

**José Horacio Tovar-Hernández**

Instituto Tecnológico de Morelia

**Jesús María López-Lezama**

Universidad de Antioquia

**Rogelio O. Corona-Núñez**

Instituto de Ecología

**Sonsoles López-Pernas**

Universidad Politécnica de Madrid

# TABLA DE CONTENIDOS

## Editorial

- ¿Investigar por investigar?** 316  
*¿Investigar por investigar?*  
César Leonardo Trujillo Rodríguez

## Ingeniería Industrial

- Approach to the behavior of cash flow with Systems Dynamics** 318  
*Aproximación al comportamiento del flujo de efectivo con Dinámica de Sistemas*  
Diego Andrés Carreño-Dueñas, Hugo Felipe Salazar-Sanabria, Josué Iván Mesa-Mojica

- Stochastic Logistic Models Applied to the Supply Chain: A Literature Review** 334  
*Modelos logísticos estocásticos aplicados a la cadena de suministro: una revisión de la literatura*  
Ricardo Andrés Cuervo Cruz, Javier Martínez Bernal, Javier Arturo Orjuela Castro

## Ingeniería Ambiental

- Technical and Economic Scenario for the Integral Small-Scale Valorization of Orange Waste in Colombia** 367  
*Escenario técnico y económico para la valorización integral a pequeña escala de residuos de naranja en Colombia*  
Santiago Bedoya Betancur, Sebastián Amar Gil, Rolando Barrera Z., Erasmo Arriola V., Alba N. Ardila A.

## Ingeniería Eléctrica y Electrónica

- Characterization of Traffic for Live Video Streaming Services on DASH in 4G Networks Based on Syntactic Analyzers** 381  
*Caracterización de tráfico para el servicio de Video Streaming en vivo sobre DASH en redes 4G basado en analizadores sintácticos*  
Héctor Fabio Bermúdez Orozco, Wilmar Yesid Campo Muñoz, Evelio Astaiza Hoyos

- Air Quality Measurement Using an IoT Network: a Case Study** 401  
*Medición de la calidad del aire mediante una red IoT: un estudio de caso*  
Hernán Paz Penagos, Andrés Moreno Sánchez, José Poveda Zafra

- Lightning Activity in the Department of Santander between 2014 and 2016** 419  
*Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016*  
Brandon Steven Ardila, Edison Andrés Soto, Kevin Alberto Velandia

## Sección Especial: Mejores artículos extendidos - WEA 2021

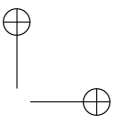
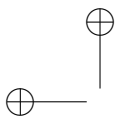
- Proposal of a Dynamic Algorithm for the Maintenance and Vehicle Routing Problem with Time Windows** 436  
*Propuesta de un algoritmo dinámico para el problema de mantenimiento y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo*  
Carlos Andrés López-Ayala, Wilson Jurado-Valbuena, Eduyn R. López-Santana

- SSOP Three-Dimensional Reconstruction of Tibia and Fibula for Applications in Biomechanical Fracture Models** 450  
*SSOP Reconstrucción tridimensional de la tibia y el peroné para su aplicación en modelos biomecánicos de fracturas*  
Valentina Mejía-Gallón, María Camila Naranjo-Cardona, Juan Atehortua Carmona, Samuel Vallejo Pareja, Juan Felipe Santa-Marin, Viviana M. Posada, Juan Ramírez

- An Approach from Software Engineering to an IoT and Machine Learning Technological Solution that Allows Monitoring and Controlling Environmental Variables in a Coffee Crop** 465  
*Un enfoque desde la ingeniería de software a una solución tecnológica de IoT y aprendizaje automático que permita monitorear y controlar las variables medioambientales en un cultivo de café*  
William Ruiz-Martínez, Arnaldo Andrés González-Gómez

- Extraordinary Passive Safety in Cars Using a Sensor Network Model** 479  
*Seguridad pasiva extraordinaria en automóviles usando un modelo de red de sensores*  
Sergio Ruiz, Farid García

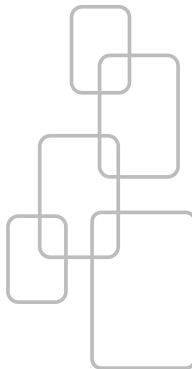
- Instructions for Authors** 493



## Editorial

### ¿Investigar por investigar?

# REVISTA Ingeniería



Desde el comienzo de los tiempos, la humanidad ha sentido curiosidad por los fenómenos, en principio naturales, que suceden a su alrededor. Esa búsqueda insaciable de respuestas a aquellas cosas que no se comprenden y posteriormente la solución a las amenazas que los circundan han hecho que a lo largo de los años se creen y establezcan pautas para que de forma sistemática se estructure el conocimiento mediante la observación, el razonamiento y la realización de pruebas y ensayos organizados de forma metódica.

Aproximadamente, hacia el año 500.000 A.C. se estima que el Homo erectus logró producir fuego de forma controlada, con el propósito de cocer alimentos, generar calor y alejar a posibles depredadores que atentaran contra su vida. Esto se pudo conseguir gracias a la observación de los fenómenos naturales que lo generaban y al posterior conjunto de pruebas y ensayos que permitieron, a través de la fricción de elementos como rocas y piedras, reproducir el fuego a voluntad.

La ciencia moderna tiene sus orígenes en las grandes civilizaciones de la Antigüedad como la sumeria, la babilónica, la mesopotámica, la egipcia, la china, la griega, entre otras, siendo esta última una de las que más documentos científicos produjo de forma escrita. Un común denominador de estas civilizaciones es que la producción de conocimiento se daba de forma empírica y, en muchos casos, justificada sobre la idea de una deidad, pero siempre sobre la base de la necesidad de explicar los fenómenos naturales circundantes y de ofrecer soluciones a las necesidades en un principio básicas y después orientadas al bienestar.

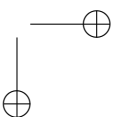
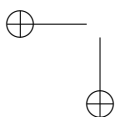
Las civilizaciones precolombinas, como la azteca, la maya y la inca, no eran ajenas a esta manifestación inherente al ser humano de sentir curiosidad e intentar entender y explicar lo que sucede a su alrededor. Realizaron grandes avances en agricultura, astronomía, arquitectura, etc. y vieron su caída con la llegada de los españoles, los cuales impusieron sus costumbres, religión, estructura social y, en consecuencia, la forma de investigar sustentada, al igual que las civilizaciones de antaño, en la creencia en un dios.

Pese al oscurantismo que reinó en Occidente durante la Edad Media, el conocimiento científico siempre encontró caminos y formas de abrirse paso. Por ello, en el declive de la Edad Media nacen las primeras universidades como

Open access



Citación: C. Trujillo-Rodríguez, “¿Investigar por investigar?”, Ingeniería, vol. 26, no. 3, pp. 316-317, (2021).  
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.18802>



centros de reunión entre profesores y académicos en torno al aprendizaje, lo que sirvió de antesala al Renacimiento, iniciado en Italia en el siglo XIV. Uno de sus principales exponentes, Galileo Galilei, apoyó sus investigaciones sobre la base del método científico, lo que lo ubica como el padre de las ciencias modernas.

De Galileo hasta el día de hoy, la concepción de investigación y sus procesos adjuntos se han ajustado a los retos cada vez más cambiantes de la sociedad, pero sustentados sobre la idea de antaño: la curiosidad constante, el querer dar una explicación racional a aquellos fenómenos desconocidos, siguiendo un proceso sistemático y metódico.

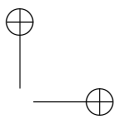
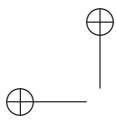
Sin embargo, una mirada crítica al desarrollo actual de la investigación a nivel mundial genera varios interrogantes. Hoy por hoy, la investigación se desarrolla en grandes centros de I+D financiados por asociaciones público-privadas, que en definitiva quieren resolver problemas puntuales que en su mayoría generen dividendos y, por qué no, mejoren las condiciones de vida de los seres humanos, aunque esto último no sea siempre el objetivo. Por otra parte, se encuentra la investigación al interior de las universidades, en institutos que congregan grupos de investigación que a priori son más autónomos en las temáticas que investigan, aunque sujetos a un presupuesto limitado, si este proviene de los propios recursos de la universidad.

En Colombia, así como en otras partes del mundo, desde principios del presente siglo, para conseguir mejores resultados de investigación desde las universidades, los gobiernos formularon leyes y normas, con el fin de obtener dichos resultados por decreto y plasmarlos en indicadores de producción científica, lo que llevó a exigir al profesor a aumentar el número de publicaciones, con el ánimo de mantener su contrato o aumentar el salario. Ese tipo de acciones, en principio no está mal, es bueno que se reconozca el trabajo, pero de “calidad”. Sin embargo, el afán de generar productos sobre investigaciones inocuas y vacías y que no aportan en nada, es cada vez más frecuente. El nacimiento de revistas predatoras en las cuales se paga para que se publique cualquier cosa, sin importar la calidad, está en aumento; al parecer la frase “publicar o perecer”, que viene acuñándose desde hace unos años, toma cada vez más fuerza. Se ha desvirtuado el concepto de investigación, que por siglos se había venido construyendo, para dar paso a una mecanización del proceso y una valoración en términos de indicadores superfluos; es por eso por lo que es necesario hacer un alto en el camino y preguntarse, ¿investigar por investigar?

**César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.**

[cltrujillo@udistrital.edu.co](mailto:cltrujillo@udistrital.edu.co)

**Universidad Distrital Francisco José de Caldas**



Research

REVISTA  
Ingeniería

## Aproximación al comportamiento del flujo de efectivo con Dinámica de Sistemas

*Approach to the behavior of cash flow with Systems Dynamics*

**Diego Andrés Carreño-Dueñas**<sup>1</sup>, **Hugo Felipe Salazar-Sanabria**<sup>2</sup>,  
**Josué Iván Mesa-Mojica**\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Administración Industrial, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Duitama, Boyacá),

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Sogamoso, Boyacá)

\*correspondence email: josue.mesa@uptc.edu.co

Recibido: 18/05/2020. Modificado: 01/06/2021. Aceptado: 09/06/2021.

### Abstract

**Context:** Cash flow is an essential element for decision-making within organizations, since knowing the cash flow of a period can determine if profits or losses are being generated. Therefore, it is vitally important to know the behavior of the cash flow to reduce the risk of presenting future cash deficits.

**Method:** A bibliographic review was carried out identifying characteristics and variables that intervene in the cash flow of a common organization. In addition, a model is proposed that allows representing the behavior of cash flow in organizations using the variables found in the bibliographic review and which is developed using system dynamics.

**Results:** A model was developed that is developed through system dynamics in which the cash flow variables are integrated, and in turn, allows the creation of simulation scenarios in which the cash flow variables are modified and the behavior of the flow is determined cash on time.

**Conclusions:** With the correct parameterization of variables, using real figures and statements, it is possible to use the proposed model as an experimentation platform to evaluate the impact of implementing different policies aimed at maintaining the level of cash flow and evaluating its viability.

**Keywords:** model, cash flow, system dynamics

**Language:** Spanish

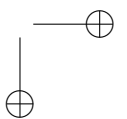
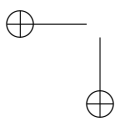
Open access



Cite this paper as: Carreño-Dueñas, D. A., Salazar-Sanabria, H. F., Mesa-Mojica, J. I.: Aproximación al comportamiento del flujo de efectivo con Dinámica de Sistemas. INGENIERÍA. Vol. 26, Num. 3, 2021. 318-333.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.16339>



### Resumen

**Contexto:** El flujo de efectivo es un elemento esencial para la toma de decisiones dentro de las organizaciones, dado que al conocer el flujo de efectivo de un periodo se puede determinar si se están generando ganancias o pérdidas. Por lo tanto, es de vital importancia conocer el comportamiento del flujo de efectivo para disminuir el riesgo de presentar déficit de efectivo en el futuro.

**Método:** Se realizó una revisión bibliográfica identificando características y variables que intervienen en el flujo de efectivo de una organización común. Además, se planteó un modelo que permite representar el comportamiento del flujo de efectivo en las organizaciones utilizando las variables encontradas en la revisión bibliográfica y el cual se desarrolla mediante dinámica de sistemas.

**Resultados:** Se obtuvo un modelo que se desarrolla mediante dinámica de sistemas en el que se integran las variables del flujo de efectivo y, a su vez, permite crear escenarios de simulación en los que se modifican estas variables y se determina el comportamiento del flujo de efectivo en el tiempo.

**Conclusiones:** Con una correcta parametrización de variables, utilizando cifras y estados reales, es posible emplear el modelo propuesto como una plataforma de experimentación para estimar el impacto de implementar distintas políticas orientadas a mantener el nivel del flujo de efectivo y evaluar su viabilidad.

**Palabras clave:** modelo, flujo de efectivo, dinámica de sistemas

**Idioma:** Español.

## 1. Introducción

El flujo de efectivo es considerado por distintas organizaciones un referente fundamental a la hora de tomar decisiones contables, dado que este concepto relaciona distintas variables propias del ejercicio contable [1], es un elemento primordial, entre otros aspectos, para valorar las empresas y evaluar su rendimiento económico. El flujo de efectivo o caja, como concepto contable y financiero, es utilizado como elemento base para la toma de distintas decisiones [1], entre las que se pueden mencionar la fijación de objetivos y la creación de valor como las más importantes.

Los flujos de efectivo permiten a los analistas realizar simulaciones y análisis de sensibilidad, en los que se puede modificar alguna de las variables que los integran, condición propicia para pensar en una representación del flujo de efectivo bajo la mirada de la dinámica de sistemas. Los flujos de caja se pueden clasificar según su origen o procedencia y, para el caso del presente trabajo, según su destino o aplicación [1].

El tipo de flujo de efectivo o caja que se va a analizar en el presente trabajo es el *cash flow* de las operaciones ordinarias o de la actividad de la empresa. Se analizan los cobros y pagos habidos en la empresa en un periodo determinado, incluyendo operaciones como cobros a clientes, pagos a proveedores y suministradores de servicios fundamentales, entre otros [1].

Contando con el supuesto de que el flujo de caja permite una mejor toma de decisiones y dado que es posible representarlo con un modelo basado en dinámica de sistemas, lo que permite aprovechar la tecnología de la informática, se ha facilitado el desarrollo de herramientas que ayudan a las empresas a tomar decisiones apoyadas en modelos informáticos con un mínimo de riesgo y cuyo propósito es representar un proceso, un fenómeno o una actividad real [2]. En este sentido, la dinámica de sistemas se apoya en la tecnología informática para representar sistemas mediante modelos que manifiestan la realidad pero que son más fáciles y simples de analizar.

Cabe mencionar que la dinámica de sistemas facilita el entendimiento y el análisis de casi cualquier tipo de sistema que considere entradas, procesos, salidas y retroalimentaciones, en el que la interacción de las variables que lo integran son puestas a consideración, poniendo de manifiesto las relaciones de reciprocidad e interdependencia, facilitando encontrar puntos clave, neurálgicos o de apalancamiento, para así entender cómo funciona el sistema y efectuar sus posibles mejoras [11].

Diversas organizaciones han utilizado la simulación para evaluar funciones administrativas, de acuerdo al área productiva; en el trabajo desarrollado por [3] se afirma que la simulación permite experimentar diferentes escenarios del modelo inicial sin afectar el entorno real, y esto permite reducir el riesgo y los costos de oportunidad de una experimentación con la realidad. Muestra de ello es el trabajo propuesto en [4], donde se utiliza la simulación para identificar cómo aumentar la eficiencia de las líneas de producción en una organización. También la simulación se ha utilizado en el área de producción para identificar ineficiencias operativas y capacidad instalada [5] y, a su vez, se encuentran estudios en áreas financieras, de mercado y temas relacionados con los proyectos de inversión.

El área financiera es la encargada de brindar soportes adecuados para lograr el propósito económico de empresas ya constituidas o de proyectos de inversión [6], por esta razón, vale la pena investigar esta área e identificarla como de vital importancia, no solo desde el punto de vista de las organizaciones sino también desde la academia. En ese sentido, [7] menciona que es posible realizar proyecciones financieras de las organizaciones por medio de la simulación continua, teniendo en cuenta variables como liquidez, capital de trabajo, inversiones, rentabilidad, entre otras.

En los trabajos realizados por [8] y [9] se resalta que otro importante aspecto en las empresas es el flujo de caja, el cual representa los flujos de ingresos y egresos de dinero en efectivo que ha tenido una empresa durante un periodo de tiempo determinado, en donde la diferencia entre los ingresos y los egresos de efectivo se conoce como saldo, el cual puede ser favorable (cuando los ingresos son mayores que los egresos) o desfavorable (cuando los egresos son mayores que los ingresos) [9], [10]; esta condición y el modelo desarrollado permiten comprender el comportamiento de las variables que podrían afectar la liquidez de una empresa, es decir, la disponibilidad de efectivo que debe asegurarse para satisfacer las condiciones cuantitativas y de oportunidad propias de los compromisos asumidos por la empresa [6].

En el modelo propuesto en esta investigación el sistema es el flujo de efectivo o caja de las empresas, y para cualquier empresario, estudiante o usuario, el modelo de simulación será una herramienta que le permitirá entender las relaciones entre las variables que intervienen en el flujo de efectivo o caja y, a su vez, tomar decisiones acerca del funcionamiento de su negocio y la liquidez o el dinero circulante que se tenga en determinado momento en razón a la disponibilidad de los recursos, lo cual es de vital importancia para las empresas. Por medio de este modelo, desarrollado en dinámica de sistemas, se pretende mostrar las variables de stock y de flujo que hacen que el nivel del dinero líquido o disponible aumente o disminuya, adicionalmente permite mejor comprensión y análisis del cambio de valor en las variables a través del tiempo y crea escenarios para probar el efecto de políticas orientadas específicamente a determinar los niveles de efectivo óptimos en las organizaciones [12].

## 2. Conceptualización sistémica

Se parte del concepto de flujo de efectivo o caja, el cual representa los flujos de ingresos y egresos de dinero en efectivo que ha tenido una empresa durante un periodo de tiempo determinado [8], [9], el cual puede ser favorable (cuando los ingresos son mayores que los egresos) o desfavorable (cuando los egresos son mayores que los ingresos) y se conoce como saldo [9], [10].

En razón a lo anterior, es posible asumir que los flujos tanto de ingresos como de egresos son variables de flujo y el saldo puede ser considerada la variable de stock, y en este sentido uno de los grandes retos para los investigadores es la determinación del comportamiento del flujo de caja a largo plazo cuando existen cambios en las variables que condicionan su comportamiento. Sin embargo, determinar el comportamiento del flujo de efectivo o caja a largo plazo puede llegar a ser complejo, debido a las relaciones de interdependencia de las variables; una metodología propicia para determinar el comportamiento del flujo de caja es la dinámica de sistemas. Además, [13] comenta que la dinámica de sistemas es una metodología que permite comprender el comportamiento de un sistema complejo cuando las variables que influyen en este sufren cambios a través del tiempo.

Adicionalmente, [14] afirma que la dinámica de sistemas permite analizar fenómenos en términos de sistemas realimentados; el comportamiento dinámico de estos fenómenos resulta de la interacción entre variables de stock o de acumulación, variables de flujo y variables auxiliares, y estas variables en lenguaje de dinámica de sistemas se representan por medio de ecuaciones diferenciales [15]. En el trabajo de [16] se menciona que, en términos del pensamiento sistémico, el flujo de caja de una organización o de un proyecto es un proceso integrado y dinámico que implica bucles de realimentación positiva y bucles con retrasos.

Para analizar el flujo de efectivo o caja desde un enfoque de la dinámica de sistemas se tomará el proceso iterativo propuesto por [17], el cual es el siguiente:

- i. Definición del problema: se define el problema a solucionar o analizar, es decir, se identifican las variables endógenas y exógenas que afectan el sistema, y se identifica la interacción de estas variables y sus límites por medio de diagramas causales [15].
- ii. Hipótesis dinámica: se formula una hipótesis del funcionamiento del sistema en términos de la estructura endógena de retroalimentación [17].
- iii. Formulación del modelo: se incluyen en el modelo las ecuaciones que permiten expresar de forma matemática los procesos de flujo y acumulación del sistema.
- iv. Corrida del modelo: el modelo formulado anteriormente se ingresa en un software que permita integrar los tipos de variables que se tengan de forma dinámica, y se realizan simulaciones preliminares.
- v. Validación: se deben de realizar pruebas que validen la estructura y el comportamiento del sistema, los resultados de la simulación deben de ser similares al sistema real.
- vi. Formulación de políticas y evaluación: se plantean escenarios y se evalúa el comportamiento pronosticado de estos.



### 3. Definición de problema e hipótesis dinámica

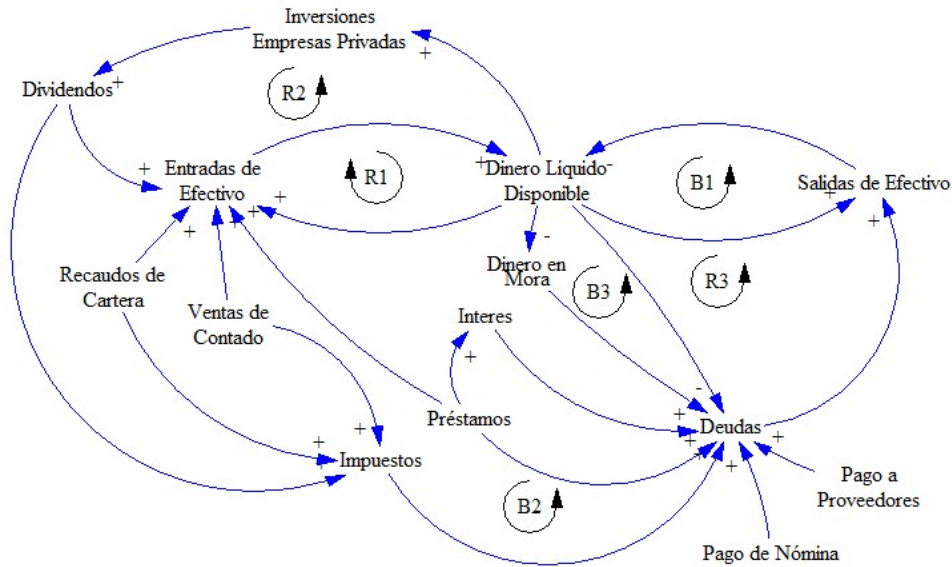
El principal objetivo de este trabajo es utilizar la dinámica de sistemas para representar el comportamiento del flujo de efectivo y su evolución en el tiempo cuando se realizan cambios en las variables del sistema. Por lo tanto, la definición del problema partirá del concepto de que el flujo de efectivo tiene entradas y salidas de dinero; las entradas de efectivo están condicionadas por el dinero líquido disponible, por el porcentaje destinado a inversiones en empresas privadas, por los dividendos recibidos de las inversiones, por el dinero solicitado a bancos como préstamo el cual tiene un costo o interés, por el dinero que va a recibir la empresa por concepto de la venta de sus productos a crédito (recaudos de cartera) y por el dinero que se dispone al instante por la venta de sus productos (ventas de contado).

Las salidas de efectivo están condicionadas por las deudas y, a su vez, las deudas están condicionadas por las variables: intereses —generados por los préstamos y la demora en bancos—, pago a nómina —dinero que se debe pagar por el servicio prestado por los trabajadores—, pago de proveedores de contado y a crédito —dinero que se debe pagar a los proveedores por el suministro de materia prima o insumos, e impuestos.

La relación de las variables a utilizar en el modelo de simulación de flujo de caja o *cash flow* se evidencia en la Figura 1, la cual contiene el diagrama causal y servirá como insumo para la realización de la simulación dinámica.

A continuación, se realiza una descripción de las variables auxiliares utilizadas en el modelo (funciones de variables de stock):

- Dinero (DI): dinero disponible para invertir o que va directamente a las entradas de efectivo.
- Entradas de efectivo (EE): dinero que entra en el sistema.
- Inversiones en empresas privadas (IEP): dinero que se invierte en empresas privadas.
- Dividendos (DV): ganancias obtenidas por la inversión de dinero en empresas privadas.
- Préstamos (P): dinero que solicita la empresa para capitalizar su ejercicio de producción.
- Ventas de contado (VC): dinero disponible al instante por venta de productos.
- Recaudos de cartera (RC): acreencias que tiene la organización, es decir, dinero que se demora en estar disponible.
- Deudas (D): obligaciones de dinero que tiene que pagar la empresa.
- Pago de nómina (PN): egreso de dinero programado.
- Pago a proveedores de contado (PPCO): egreso de dinero inmediato por concepto de la adquisición de materias primas o insumos.
- Pago a proveedores a crédito (PPCR): egreso de dinero a crédito por concepto de la adquisición de materias primas o insumos.



**Figura 1.** Diagrama causal  
**Fuente:** elaboración propia.

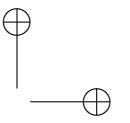
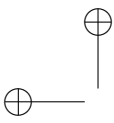
- Impuestos (IM): carga impuesta al dinero percibido, ya sea por ventas de contado, recaudo de cartera o dividendos.
- Intereses (IN): egreso generado por el pago de intereses debido a préstamos o demora en los pagos a bancos.
- Bancos (B): dinero que se debe a los bancos, sea por préstamos o mora.
- Demora en pago a bancos (DPB): egreso generado por la mora en los pagos a bancos.
- Dinero en mora (DM): dinero que se tiene en mora por el no pago de obligaciones adquiridas con bancos.

La variable de stock (caracterizan el estado del sistema y generan la respuesta del sistema) incluida en el modelo es:

- Dinero líquido disponible (DLD): variable de respuesta del modelo cuya interacción depende de las entradas y salidas de efectivo.

Las variables de flujo (tasas que afectan las variables de stock a través del tiempo) incluidas en el modelo son:

- Entradas de efectivo disponibles (EED): variable que cuantifica el total de entradas de efectivo que se tendrán disponibles en un periodo de tiempo.



- Salidas de efectivo (SE): variable que cuantifica el total de salidas de efectivo que se tendrán en un periodo de tiempo.

Después de identificar las variables del modelo y las relaciones de estas, se procede a identificar dos tipos de bucles de realimentación, los cuales son: bucles de realimentación de equilibrio, subdivididos en B1 (DLD-SE-DLD), B2 (IM-D-SE-DLD-IEP-DV-IM) y B3 (DM-D-SE-DLD-DM); bucles de realimentación de refuerzo, subdivididos en R1 (EF-DLD-EF), R2 (DV-EF-DLD-IEP-DV) y R3 (DLD-D-SE-DLD).

Siguiendo con el proceso iterativo propuesto por [17], se formula la siguiente hipótesis dinámica: las variables dividendos, recaudos de cartera, ventas de contado e inversiones en empresas privadas hacen que el dinero líquido disponible se incremente, y las variables salida de efectivo, pago a proveedores, pago de nómina, impuestos, prestamos e interés y dinero en mora hacen que el dinero líquido disponible disminuya.

## 4. Formulación y corrida del modelo

En esta parte del trabajo se hace una descripción formal de la estructura en de las ecuaciones en notación Forrester que representan el modelo del flujo de efectivo. Las ecuaciones se presentan diferenciadas en: de nivel, de flujo o de tasas y auxiliares [18].

La ecuación de nivel de estado o variable de respuesta es el dinero líquido disponible:

$$DLD_J = DLD_{J-1} + (EED_J + SE_J) \quad (1)$$

Las ecuaciones que se utilizaron en el modelo son las siguientes:

- Entradas de efectivo disponibles:

$$EED_J = EE_J \quad (2)$$

- Salidas de efectivo:

$$SE_J = D_J \quad (3)$$

- Dinero:

$$DI_J = IF(DLD_{J-1} > 0) THEN (DLD_{J-1}) ELSE (0) \quad (4)$$

- Entradas de efectivo:

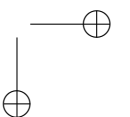
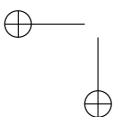
$$EE_J = (DI_{J-1} \cdot \%INV) + DV_{J-T} + P_J + RC_J + VC_J + IEP_{J-T} \quad (5)$$

- Inversiones en empresas privadas:

$$IEP_J = DELAY(DI_{J-1} \cdot (1 - \%INV), T, 0) \quad (6)$$

- Dividendos:

$$DV_J = IEP_{J-T} \cdot \%R \quad (7)$$



- Préstamos:

$$P_J = \text{Cantidad a pedir prestada a bancos} \quad (8)$$

- Recaudos de cartera:

$$RC_J = N(\text{Media, Desviación}) \quad (9)$$

- Ventas de contado:

$$VC_J = N(\text{Media, Desviación}) \quad (10)$$

- Deudas:

$$D_J = IM_J + IN_J + PPCO_J + PPCR_{J-A} + PN_J + \left( \frac{PPCR_{j-B}}{B} \right) \quad (11)$$

- Pago de nómina:

$$PN_J = \text{Valor a pagar por nómina} \quad (12)$$

- Pago a proveedores de contado:

$$PPCO_J = \text{Valor a pagar a proveedores de contado} \quad (13)$$

- Pago a proveedores a crédito:

$$PPCR_J = DELAY(\text{Valor a pagar a proveedores crédito}, A, 0) \quad (14)$$

- Impuestos:

$$IM_J = ((RC_J + VC_J) \cdot \%IM1) + (DV_J \cdot \%IM2) \quad (15)$$

- Intereses:

$$IN_J = B_J \cdot \%I \quad (16)$$

- Bancos:

$$B_J = DPB_J + P_J \quad (17)$$

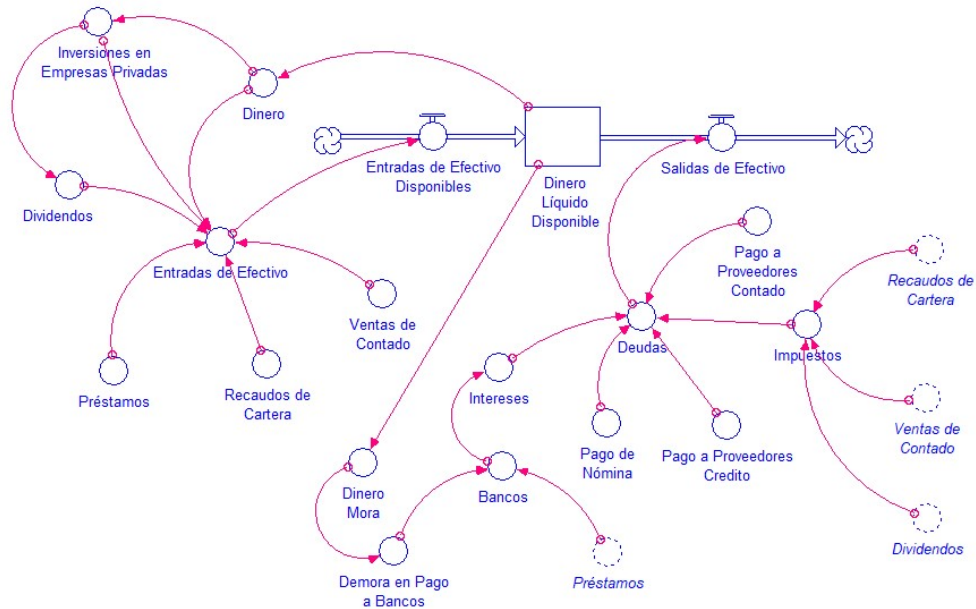
- Demora en pago a bancos:

$$DPB_J = DM_{J-1} \cdot \%M \quad (18)$$

- Dinero en mora:

$$DM_J = IF(DLD_{J-1} > 0) THEN(0) ELSE(-DLD_{J-1}) \quad (19)$$

Después de formular las ecuaciones que formarán parte del modelo, se procede a formular este modelo en software Stella, dado que este permite integrar los tipos de variables mencionados anteriormente de forma dinámica. En la Figura 2 se puede ver el resultado de la interpretación sistémica del comportamiento del flujo de caja, en el que las retroalimentaciones, junto con los retrasos, determinan la dinámica del comportamiento del sistema [17], [19].



**Figura 2.** Diagrama de Forrester

**Fuente:** elaboración propia.

## 5. Validación del modelo y formulación de escenarios

En los trabajos realizados por [2] y [11], específicamente en lo relacionado con la validación del modelo y la aproximación a la realidad de los modelos desarrollados en dinámica de sistemas, los autores mencionan que no es posible representar de manera exacta y sin error el comportamiento de un sistema real. Sin embargo, los modelos desarrollados en dinámica de sistemas permiten lograr una aproximación muy cercana a la realidad.

Por su parte, [20] menciona que el nivel de detalle del modelo se relaciona con el costo y el tiempo del desarrollo del modelo, es así que para poder minimizar estas dos condiciones y permitir un acercamiento lo bastante razonable en términos prácticos se debe de definir muy bien el propósito del modelo. Sumado a lo anterior, cuando el investigador ha definido el objetivo del modelo, podrá omitir detalles que no son relevantes a su criterio, el cual tendrá como base su conocimiento del comportamiento del sistema estudiado.

Con el propósito de disminuir la distorsión en el comportamiento del modelo, se incluyen las pruebas de validación propuestas por [20], las cuales son: prueba de estructura y prueba de condiciones extremas, ya que estas permiten identificar el correcto modelamiento de un sistema, y verificar su comportamiento.

Una vez validado el modelo se planean dos escenarios: primero, las entradas de efectivo son mayores a la salida de efectivo; segundo, las salidas de efectivo son mayores a las entradas de efectivo. Estos escenarios permitirán comparar el flujo de efectivo e identificar el efecto que tienen sobre el comportamiento.

### 5.1. Prueba de estructura y condiciones extremas

La prueba de estructura consiste en determinar si la estructura del modelo coincide con la del sistema que está siendo modelado [1]. Por lo tanto, se trata de comprobar si cada uno de los elementos del modelo tiene una contraparte en el sistema real, y si estos elementos permiten estimar el comportamiento del sistema por medio del modelo [1], [11].

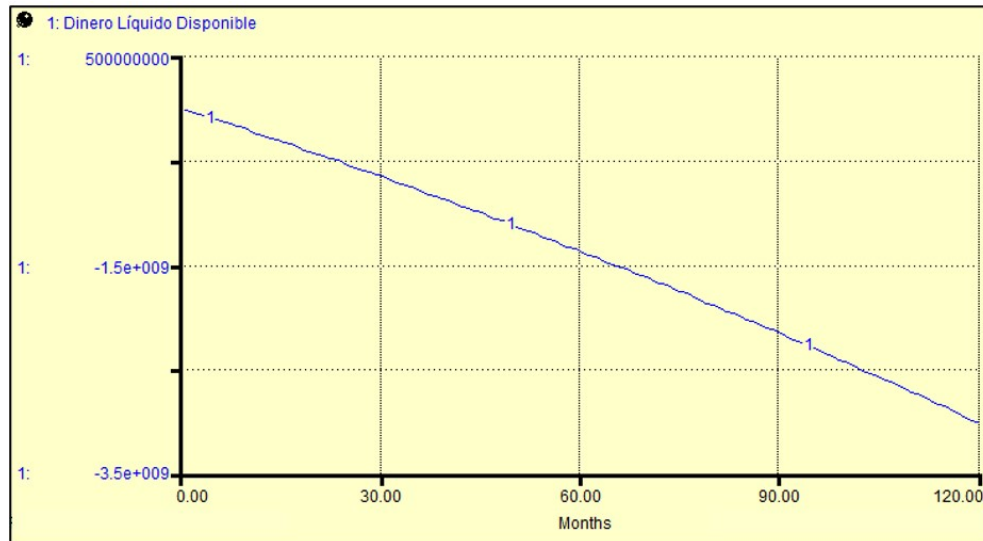
En [20] se menciona que la prueba de estructura puede parecer sencilla, sin embargo, en algunos sistemas puede llegar a ser muy compleja, debido a que las relaciones entre las partes estructurales de los sistemas no son fáciles de identificar, y la descripción de las relaciones se debe basar en conceptos o modelos mentales de personas que tienen un amplio conocimiento del sistema. Por lo tanto, este enfoque tiene una perspectiva diferente respecto a otras metodologías, debido a que su enfoque se orienta al análisis estructural del modelo, a diferencia de la mayoría de las metodologías, las cuales dan mayor importancia a la recolección y al análisis de los datos, ya que estos permiten inferir el comportamiento del sistema.

Al realizar la prueba de estructura para el modelo del flujo de efectivo o caja que se tiene en una organización, se puede afirmar que el modelo planteado si describe el flujo de efectivo o caja de las organizaciones, debido a que cumple a cabalidad con la definición dada por [9] del flujo de efectivo o caja. Además que los elementos del modelo encuentran su contraparte en el sistema real y presentan comportamientos similares, es decir, el flujo de efectivo o caja se comporta de acuerdo con la liquidez de un periodo estudiado [1].

Adicionalmente, los sistemas contables utilizan las mismas cuentas de entrada de dinero o de efectivo y las mismas variables de salida de efectivo que las usadas en el modelo descritas en la segunda parte del presente trabajo; en ese sentido, la diferencia será llamada saldo o liquidez, la cual es la variable de respuesta del modelo objeto de estudio. Por lo tanto, al comparar las variables del modelo propuesto con las variables de los sistemas contables y obtener similitud entre estas, se ratifica la validez del modelo propuesto mediante la prueba de estructura.

De otro lado, la prueba de condiciones extremas consiste en plantear escenarios extremos y ver los efectos que generan en el sistema modelado, por lo que la prueba de condiciones extremas tiene relación con la prueba de estructura del modelo. Adicionalmente, [11] menciona que los modelos que muestran un buen funcionamiento en condiciones extremas pueden considerarse como herramienta de evaluación de políticas y, asimismo, aumentan la confianza del usuario.

En ese sentido, el trabajo de [2] expone que estas pruebas son del tipo “qué pasaría si”, donde se modifican los valores de los parámetros del modelo hasta valores poco probables, lo cual permitirá evaluar el impacto que genera en los demás elementos del modelo. Además, las pruebas de condiciones extremas exponen fallas estructurales y valores de los parámetros erróneos.



**Figura 3.** Escenario 1, condición extrema sin ingresos de efectivo

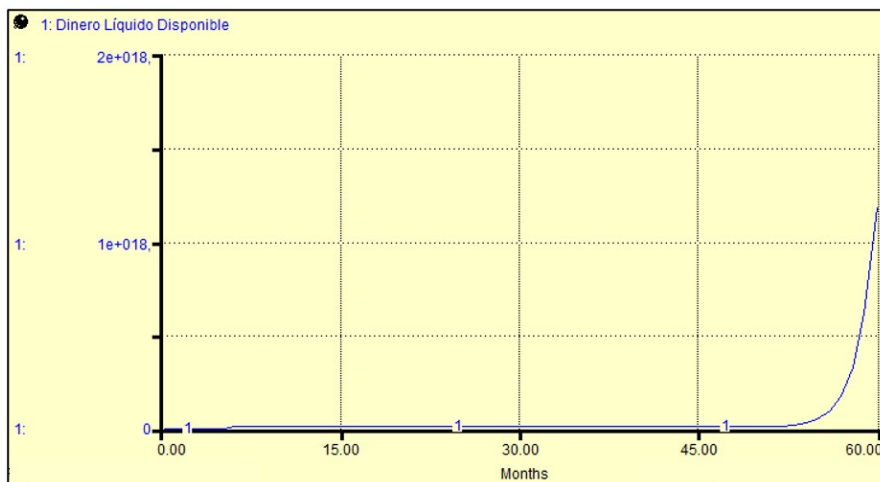
**Fuente:** elaboración propia.

Por lo tanto, la prueba que se plantea en el escenario 1 es la condición extrema que pasaría si no hay flujo de efectivo, es decir, limitar a cero los ingresos; en la Figura 3 se evidencia el comportamiento de la variable dinero líquido disponible en función de un horizonte de tiempo de ciento veinte meses, el cual se simuló utilizando el software Stella.

Luego de aplicar el efecto limitante de los parámetros de cero ingresos de efectivo, el resultado es un valor decreciente en la variable de respuesta dinero líquido disponible, lo cual indica un correcto funcionamiento del modelo de simulación propuesto, debido a que, si no se tienen ingresos de efectivo y se tienen salidas de efectivo, no habrá dinero disponible y se generaran deudas.

Sin embargo, se planteó un escenario 2, en el que la condición extrema es que pasaría si no existen salidas de efectivo; en la Figura 4 se evidencia el comportamiento de la variable dinero líquido disponible en función de un horizonte de tiempo de ciento veinte meses, el cual se simuló utilizando el software Stella.

Luego de aplicar el efecto limitante de los parámetros de cero salidas de efectivo, el resultado es un valor creciente exponencialmente en la variable de respuesta dinero líquido disponible, lo cual indica un correcto funcionamiento del modelo de simulación propuesto, debido a que, si no se tienen egresos de efectivo y se tienen ingresos de efectivo probabilísticos, se tendrá dinero disponible en el tiempo con crecimiento exponencial.



**Figura 4.** Escenario 2, condición extrema sin salidas de efectivo

**Fuente:** elaboración propia.

## 5.2. Formulación de escenarios

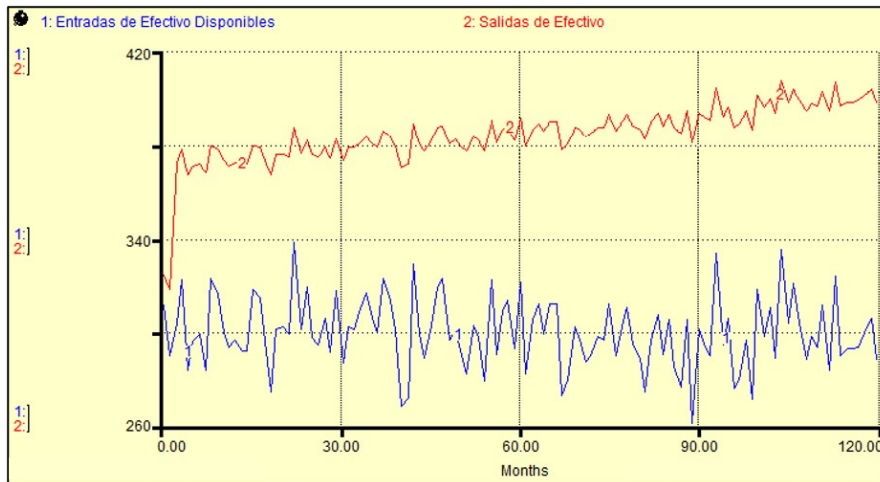
El último de los pasos del proceso iterativo propuesto por [17] es la formulación de escenarios. Por lo tanto, se plantearon dos escenarios adicionales a los de las pruebas de condiciones extremas, los cuales son:

**Escenario 1:** se plantea un escenario en el que las salidas de efectivo fueran mayores a las entradas de efectivo; en la Figura 5 se evidencia el comportamiento de las salidas de efectivo y el comportamiento de las entradas de efectivo, se evidencia una curva por debajo de las salidas de efectivo que representa los ingresos de efectivo, por lo tanto, en la Figura 6 se evidencia el comportamiento de la variable dinero líquido disponible en función de un horizonte de tiempo de ciento veinte meses, el cual se simuló utilizando el software Stella.

Luego de aplicar el efecto que los ingresos de efectivo sean menores a las salidas de efectivo, el resultado es un valor decreciente en la variable de respuesta dinero líquido disponible, lo cual indica un correcto funcionamiento del modelo de simulación propuesto, debido a que, si se tienen ingresos de efectivo menores a las salidas de efectivo, no se tendrá dinero disponible en el tiempo y se incurrirá en deudas.

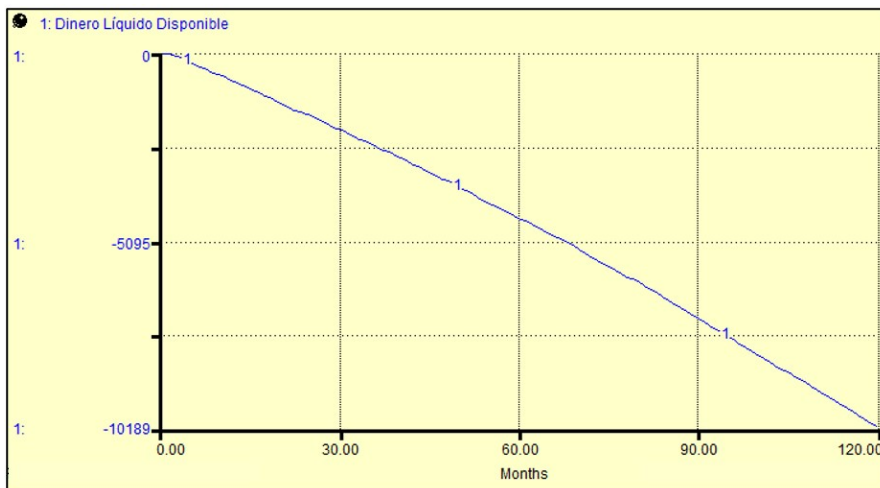
**Escenario 2:** se plantea el escenario en el que se tienen ingresos de efectivo mayores que las salidas de efectivo en algunos periodos; en la Figura 7 se evidencia el comportamiento de las salidas de efectivo y el comportamiento de las entradas de efectivo, se evidencia una curva por encima de las salidas de efectivo en algunos meses que representa los ingresos de efectivo, por lo tanto, en la Figura 8 se evidencia el comportamiento de la variable dinero líquido disponible en función de un horizonte de tiempo de ciento veinte meses, el cual se simuló utilizando el software Stella.





**Figura 5.** Escenario 1, comportamiento entradas y salidas de efectivo

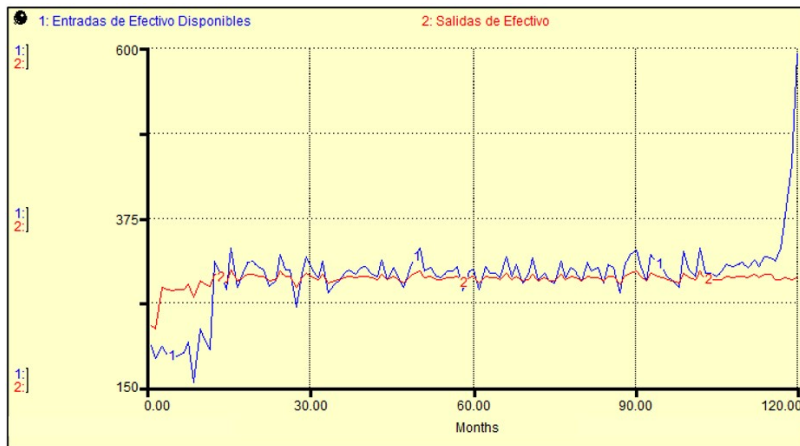
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 6.** Escenario 1, salidas de efectivo mayores a entradas de efectivo

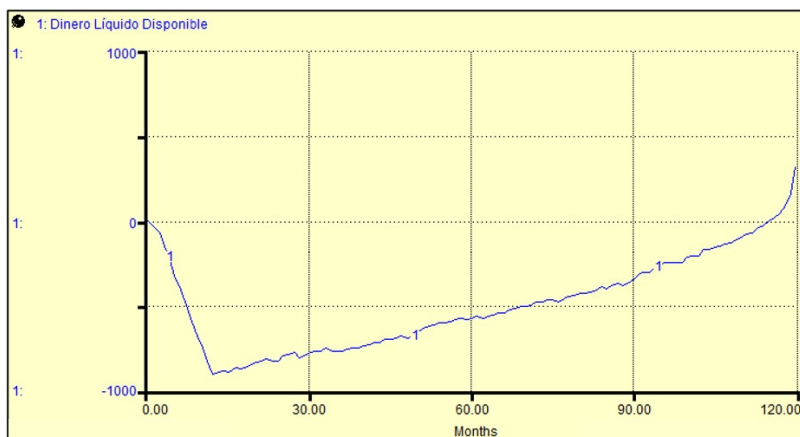
**Fuente:** elaboración propia.

Luego de aplicar el efecto que los ingresos de efectivo sean mayores en algunos meses a las salidas de efectivo, el resultado es un valor decreciente en la variable de respuesta dinero líquido disponible para los primeros meses cuando se tienen salidas de efectivo mayores a los ingresos de efectivo, y en los siguientes meses el dinero líquido disponible presenta un crecimiento cuando se tienen



**Figura 7.** Escenario 2, comportamiento entradas y salidas de efectivo

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 8.** Escenario 2, entradas de efectivo mayores a las salidas de efectivo

**Fuente:** elaboración propia.

entradas de efectivo mayores a las salidas de efectivo, lo cual indica un correcto funcionamiento del modelo de simulación propuesto, debido a que si se tienen ingresos de efectivo menores a las salidas de efectivo, no se tendrá dinero disponible en el tiempo y se incurrirá en deudas, y si se tienen ingresos de efectivo mayores a las salidas disponibles se tendrá dinero disponible en el tiempo.

## 6. Conclusiones y discusiones futuras

Como se indicó anteriormente el flujo de efectivo o caja es de vital importancia para cualquier organización, sin embargo, en la literatura la existencia de modelos de simulación que permitan integrar las variables del flujo de efectivo desde el punto de vista de un estado de resultados es considerablemente limitada. Por lo cual en esta investigación se planteó un modelo de simulación a largo plazo basado en dinámica de sistemas que representa el comportamiento del flujo de efectivo, este modelo permite realizar cambios o variaciones en las variables que influyen en el flujo de efectivo y los efectos que causan en este. El presente trabajo brinda una metodología alternativa para un mejor entendimiento del concepto del flujo de efectivo, dado que, al realizar una correcta parametrización de las variables, y utilizando cifras y estados reales, es posible emplearlo como una plataforma de experimentación para evaluar el impacto de implementar distintas políticas orientadas a mantener el nivel del flujo de efectivo y evaluar su viabilidad.

Con relación a lo anterior, los escenarios propuestos en esta investigación permiten probar la validez del modelo y confirman el postulado contable de que para tener dinero disponible (flujo de efectivo o caja positivo) los ingresos en una organización deben ser mayores a los egresos o salidas de dinero, de lo contrario cualquier organización sufrirá de problemas de liquidez financiera.

Es de resaltar que en trabajos futuros se podría plantear una comparación entre el porcentaje de ventas de contado y el porcentaje de ventas a crédito frente a las salidas de efectivo, y de esta manera contrastar la flexibilidad de la empresa en cuanto al balance entre ventas, obligaciones bancarias y pago de proveedores antes de quedarse sin efectivo, en términos de flexibilidad. También es posible, en trabajos futuros, plantear un modelo de flujo de caja que permita encontrar un equilibrio en la cantidad de dinero líquido disponible, donde se disminuyan los costos de oportunidad por tener altos niveles de efectivo disponible y se determinen los costos por no disponer de suficiente efectivo disponible.

## Referencias

- [1] N. Boal Velasco, "Los flujos de caja en las empresas", *Estrategías Financ.*, no. 249, pp. 22- 28, 2008. ↑319, 327
- [2] Y. Barlas, "Formal aspects of model validity and validation in system dynamics", *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 12, no. 3, pp. 183-210, 1996. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4) ↑319, 326, 327
- [3] B. Candelaria Martínez, O. Ruiz Rosado, F. Gallardo López, P. Pérez Hernández, Á. Martínez Becerra y L. Vargas. Villamil, "Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión", *Trop. Subtrop. Agroecosyst.*, vol. 14, no. 3, pp. 999-1010, 2011. ↑320
- [4] S. A. Fernández, A. L. Pérez y P. D. Medina, "Uso integral de simulación, diseño de experimentos y KANBAN para Evaluar y mejorar el rendimiento de una línea de producción", *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 13, no. 26, pp. 9-16, 2019. <https://doi.org/10.31908/19098367.1147> ↑320
- [5] H. A. Akkermans, and K. E. Van Oorschot, "Relevance assumed: A case study of balanced scorecard development using system dynamics", *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 56, no. 8, pp. 931-41, 2005. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601923> ↑320
- [6] Q. Cui, M. Hastak, and D. Halpin, "Systems analysis of project cash flow management strategies", *Constr. Manag. Econ.*, vol. 28, no. 4, pp. 361-376, 2010. <https://doi.org/10.1080/01446191003702484> ↑320
- [7] G. A. Méndez, P. Parra y J. Hurtado, "Simulador para el control financiero de las pymes", *Ingeniería*, vol. 14, no. 1, pp. 38-46, 2009. ↑320

- [8] N. Rodríguez-Masero y J. López-Manjón, “El Flujo de caja como determinante de la estructura financiera de las empresas españolas: un análisis en tiempos de crisis”, *Rev. Métodos Cuantitativos para la Econ. y la Empres.*, no. 21, pp. 141-159, 2016. ↑ [320](#), [321](#)
- [9] A. M. Torre Cantalapedra, “Estado de flujos de efectivo”, *Técnica Contab.*, vol. 61, no. 719, pp. 16-25, 2009. ↑ [320](#), [321](#), [327](#)
- [10] D. Kurpius, “The Fifth Discipline: The Art and Practice of The Learning Organization: Book review”, *Consult. Psychol. J. Pract. Res.*, vol. 45, no. 4, pp. 31-32, 1993. ↑ [320](#), [321](#)
- [11] R. C. Shreckengost, “Dynamic simulation models: How valid are they?”, *National Institute on Drug Abuse Research Monograph*, vol. 57, pp. 63-70, 1985. ↑ [320](#), [326](#), [327](#)
- [12] H. H. Shehata, “Systems dynamics and cash flow planning: A model for accountants”, *Managerial Finance*, vol. 2 No. 3, pp. 163-179. <https://doi.org/10.1108/eb013381>. ↑ [320](#)
- [13] D. A. Agudelo y Y. M. López, “Dinámica de sistemas en la gestión de inventarios”, *Ing. USBMed*, vol. 9, no. 1, pp. 75-85, 2018. <https://doi.org/10.21500/20275846.3305> ↑ [321](#)
- [14] J. S. Angarita-Zapata, C. A. Vásquez y H. H. Andrade-Sosa, “Ampliando procesos y espacios de aprendizaje en agroindustria con dinámica de sistemas”, *Prax. Saber*, vol. 10, no. 22, pp. 169-194, 2019. <https://doi.org/10.19053/22160159.v10.n22.2019.6197> ↑ [321](#)
- [15] J. P. Ríos-Ocampo, Y. Olaya-Morales y G. J. Rivera-León, “Proyección de la demanda de materiales de construcción en Colombia por medio de análisis de flujos de materiales y dinámica de sistemas”, *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 16, no. 31, pp. 75-95, 2017. ↑ [321](#)
- [16] K. Warren, “Improving strategic management with the fundamental principles of system dynamics”, *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 21, no. 4, pp. 329-350, 2006. <https://doi.org/10.1002/sdr.325> ↑ [321](#)
- [17] J. D. Sterman, “Systems dynamics modeling: Tools for learning in a complex world”, *IEEE Eng. Manag. Rev.*, vol. 30, no. 1, p. 42, 2002. ↑ [321](#), [324](#), [325](#), [329](#)
- [18] D. N. Ford, and J. D. Sterman, “Dynamic modeling of product development processes”, *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 31-68, 1998. ↑ [324](#)
- [19] P. M. Senge, *The Fifth Discipline: The Art and Practice of The Learning Organization*, New York: Doubleday/Currency, 1990. ↑ [325](#)
- [20] D. Carreño-Dueñas, “Propuesta para generar políticas orientadas a mitigar la congestión del tráfico vehicular del centro de la ciudad de Duitama”, Universidad de la Sabana, 2011. ↑ [326](#), [327](#)

### Diego Andrés Carreño-Dueñas

Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de la Sabana; Administrador Industrial, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela Administración Industrial.

Correo electrónico: diego.carreno@uptc.edu.co

### Hugo Felipe Salazar-Sanabria

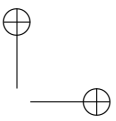
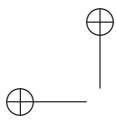
Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de Distrital Francisco José de Caldas; Ingeniero Industrial, Universidad Industrial de Santander; Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela Ingeniería Industrial.

Correo electrónico: hugo.salazar@uptc.edu.co

### Josué Iván Mesa-Mojica

Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Especialista en Ingeniería de Producción y Operaciones, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Ingeniero Industrial, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela Administración Industrial.

Correo electrónico: josue.mesa@uptc.edu.co



Review

REVISTA  
Ingeniería

## Stochastic Logistic Models Applied to the Supply Chain: A Literature Review

*Modelos logísticos estocásticos aplicados a la cadena de suministro: una revisión de la literatura*

**Ricardo Andrés Cuervo Cruz**<sup>1</sup>, **Javier Martínez Bernal**<sup>2</sup>, **Javier Arturo Orjuela Castro**\*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gran Américas Usme S.A.S., <sup>2</sup>Tuya S.A., <sup>3</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.  
\*correspondence e-mail: jorjuela@udistrital.edu.co

Recibido: 20/05/2021. Modificado: 02/06/2021. Aceptado: 08/06/2021.

### Abstract

**Context:** The analysis of the complexity of the systems involves the evolution of the models that representation of reality, logistics has advanced from a business context to the supply chain, basic models of logistics with deterministic parameters must go represent real behavior, stochastic. In this context, the combination of inventory, location and routing models with a stochastic approach applied to supply chains appears.

**Method:** A systematic review of the literature was developed in the bibliographic databases, ScienceDirect, ScholarGoogle, SpringerLink, Scopus, SemanticScholar, ResearchGate and Scielo, of the 72 referenced articles, 65 % between 2015 and 2019.

**Results:** From the models identified and described, a taxonomy of the models is proposed and classified into 4 kinds, three dyadic models Location Inventory Problem (LIP), Inventory Routing Problem (IRP), Location Routing problem (LRP) and a triadic model Location Inventory Routing Problem (LIRP). The stochastic parameters used in the models, the types of models, the solution methods, the contemplated objective functions, and the number of echelons in the supply chain are established, from which taxonomies of the different types of models are proposed. Lines of work for future research is presented.

**Conclusions:** The evolution from deterministic to stochastic models represents an increase in complexity which forces the development of new solution methods with ability to find feasible solutions. The development of models with news measurements of performance as environmental, social and humanitarian have been of recent interest. In the last period, triadic multi-product and multi-period models take on relevance.

**Keywords:** Stochastic Models, Logistics, Supply Chain, IRP, LRP, LIP, LIRP

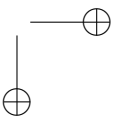
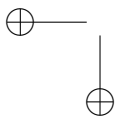
**Language:** Spanish

Open access



Cite this paper as: Cuervo-Cruz, R., Martínez-Bernal, J., Orjuela-Castro, J.: Modelos logísticos estocásticos aplicados a la cadena de suministro: una revisión de la literatura. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 334-366.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
<https://doi.org/10.14483/23448393.16357>



### Resumen

**Contexto:** El análisis de la complejidad de los sistemas conlleva la evolución de los modelos de representación de la realidad, la logística ha avanzado de un contexto empresarial a la cadena de suministro, los modelos básicos de logística con parámetros determinísticos requieren representar el comportamiento real estocástico. En este sentido, aparecen la combinación de los modelos de inventario, la localización y el ruteo con enfoque estocástico aplicados a cadenas de suministro.

**Método:** Se desarrolló una revisión sistemática de la literatura en las bases de datos bibliográficas ScienceDirect, ScholarGoogle, SpringerLink, Scopus, SemanticScholar y Scielo, así como en ResearchGate. De los 79 artículos referenciados, el 65 % comprenden entre el 2015 y 2019.

**Resultados:** Se identifican y describen los modelos, a partir de lo cual se propone una taxonomía en cuatro combinaciones, tres de modelos diádicos: LIP, IRP, LRP y un modelo tríadico: LIRP. Se identifican los parámetros estocásticos utilizados en los modelos, los tipos de modelos, los métodos de solución, las funciones objetivo contempladas y el número de eslabones de la cadena contemplados, a partir de los cuales se proponen taxonomías de los diferentes tipos de modelos. Por último, se presentan líneas de trabajo para futuras investigaciones.

**Conclusiones:** La evolución de modelos determinísticos a estocásticos representa un incremento en la complejidad, lo que obliga a desarrollar nuevos métodos de solución con capacidad de encontrar soluciones factibles. Ha sido de reciente interés el desarrollo de modelos y problemas con medidas de desempeño ambiental, social y riesgo humanitario, en el último periodo toman relevancia modelos tríadicos multiproducto y multiperiodo.

**Palabras clave:** modelos estocásticos, logística, cadena de suministro, IRP, LRP, LIP, LIRP

**Idioma:** Español

## 1. Introduction

La integración de los agentes en la economía global ha incrementado la implementación de prácticas logísticas que mejoren el desempeño de varios actores de la cadena de suministro (CS) [1]. En este sentido, las decisiones logísticas estratégicas, tácticas y operativas son de localización, inventario y ruteo respectivamente, para lo cual los tomadores de decisiones se apoyan en modelos matemáticos y de simulación. Cuando el modelo matemático se acerca al contexto de la vida real aparece la variabilidad, los parámetros determinísticos se hacen variables estocásticas. No obstante, la complejidad del modelado, y en especial de los métodos de solución con variables estocásticas, se convierte en una barrera para su uso. En un entorno de las CS que incluye varios eslabones, se complejiza más el problema, así mismo cuando se evalúan simultáneamente varias decisiones logísticas.

En la incursión a esta temática, los investigadores requieren tener un panorama global y específico de los diferentes modelos que integran la localización, el inventario y el ruteo en la toma de decisiones conjuntas, por lo cual se hace necesario establecer cómo ha evolucionado su modelado matemático, los retos y las tendencias.

La revisión de literatura permite identificar investigaciones relativas al modelado estocástico aplicado en logística de las CS y propender por una taxonomía, y que se observen nuevos estudios que proporcionan una mejor aproximación entre el modelo con lo real en temáticas de investigación en el contexto estocástico. La combinación de dos o tres *drivers* logísticos (localización, inventario o

ruteo) dan origen a modelos diádicos y tríadicos, respectivamente, la revisión incluye aquellos de los que al menos uno de sus parámetros es estocástico y contemplen dos o más eslabones de la CS. No se evidenciaron revisiones de la literatura que contemplaran el modelado tríadico estocástico, tampoco ningún trabajo que revisara estos modelos diádicos bajo un mismo enfoque de investigaciones de operaciones.

Inicialmente se presenta la metodología. Luego se presentan los modelos, que se han dividido en cinco apartes, en el primero se presentan los modelos diádicos y en segundo se presentan los modelos tríadicos, para los dos casos se presenta la taxonomía y características. En los modelos diádicos se presenta el problema de localización-inventario, el problema de localización-ruteo y el problema de inventario-ruteo. En el tercer aparte se presentan los parámetros estocásticos, en el cuarto la función objetivo y en el quinto los métodos de solución, contemplados en todos los modelos diádicos y tríadicos. Finalmente se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

## 2. Metodología

El presente artículo es resultado de una revisión sistemática de la literatura [2], [3] a través de la búsqueda, la recolección y la síntesis de información, tomada de artículos publicados en revistas científicas, mediante la consulta en ScienceDirect, ScholarGoogle, SpringerLink, Scopus, SemanticScholar y Scielo, así como en ResearchGate, adicionalmente se revisaron tesis de maestría y doctorado. En la revisión se definió la estrategia de búsqueda y los criterios de selección, análisis y síntesis. Para la búsqueda de los modelos estocásticos diádicos y tríadicos, se plantearon cuatro conjuntos de palabras clave, uno por cada tipo de modelo (ver Tabla I).

**Tabla I.** Palabras clave usadas en la revisión

Conjunto	Modelos	Palabras clave
<b>Diádico</b>	Localización-Inventario (LIP)	Stochastic, Location-Inventory, models, problems, LIP
	Localización-Ruteo (LRP)	Stochastic, Location-Routing, models, problems, LRP
	Inventario-Ruteo (IRP)	Stochastic, Inventory-Routing, models, problems, IRP
<b>Tríadico</b>	Localización-Inventario-Ruteo (LIRP)	Stochastic, Location-Inventory-Routing, models, problems, LIRP, Supply Chain Design, Supply Chain Management

\* Acrónimos por sus siglas en inglés: Location (L), Inventory (I), Routing (R), Problem (P)

Las palabras clave de cada modelo se combinan mediante operadores booleanos para formar cuatro ecuaciones de búsqueda que se presentan en la Tabla II, cada ecuación es usada en las bases de datos para título y resumen de los artículos.

Con el fin de establecer la evolución del modelado matemático integrando localización, inventarios y ruteo en las CS, así como sus retos y tendencias, se formularon como preguntas orientadoras de la búsqueda: ¿qué es un modelo estocástico en logística de las cadenas de suministro?, ¿dónde se presenta la estocasticidad en cada modelo diádico y tríadico?, ¿cómo han evolucionado los mo-

**Tabla II.** Ecuaciones de búsqueda

Modelos	Ecuaciones de búsqueda
LIP	Stochastic AND (LIP OR (“Location-Inventory” AND (models OR problems)))
LRP	Stochastic AND (LRP OR (“Location-Routing” AND (models OR problems)))
IRP	Stochastic AND (IRP OR (“Inventory-Routing AND (models OR problems)))
LIRP	Stochastic AND (LIRP OR (“Location-Inventory-Routing AND (models OR problems)) OR Supply Chain Design OR Supply Chain Management)

delos integrados de logística en las CS a través de los años?

Al aplicar la estrategia de búsqueda, se encuentran artículos que pueden ser útiles o no y documentos duplicados, por lo cual se establecen los siguientes criterios de selección:

1. Identificar documentos duplicados con ayuda de Mendeley
2. El texto debe estar disponible en su totalidad
3. Descartar todos los documentos sobre metodologías de análisis o medición del desempeño de la CS
4. Descartar los documentos con modelos causales o de dinámica de sistemas
5. Identificar los artículos seminales
6. Dar prioridad a los artículos con menos de 5 años
7. El artículo debe contener un modelo de optimización con variables de decisión y parámetros plenamente definidos
8. Al menos uno de sus parámetros debe ser de naturaleza incierta

De los artículos consultados, el 45 % corresponde a ScienceDirect y a ScholarGoogle el 43 %, a SemanticScholar, ResearchGate y Springerlink con 5 %, 4 % y 3 % respectivamente (ver Figura 1). En la selección se tuvo en cuenta la literatura reciente que aborda modelos estocásticos en la CS de los últimos 5 años, así como los artículos considerados seminales, con el fin de determinar tendencias y vacíos del conocimiento, en la Figura 1 se ve un incremento de las publicaciones en los últimos años, con el desarrollo de estos modelos. Para extraer la información de los documentos seleccionados, previamente se crearon cinco categorías para cada tipo de modelo. Estas son: tipo de modelo, características, estocasticidad de los parámetros, funciones objetivo y métodos de solución. Para la tabla, en las columnas se ubican las categorías y en las filas los artículos de cada uno de los modelos en orden cronológico, se marca una x en caso de que el modelo presentado en dicho artículo posea el aspecto nombrado en la columna. Las tablas de taxonomía resultante se muestran para cada modelo en la siguiente sección.



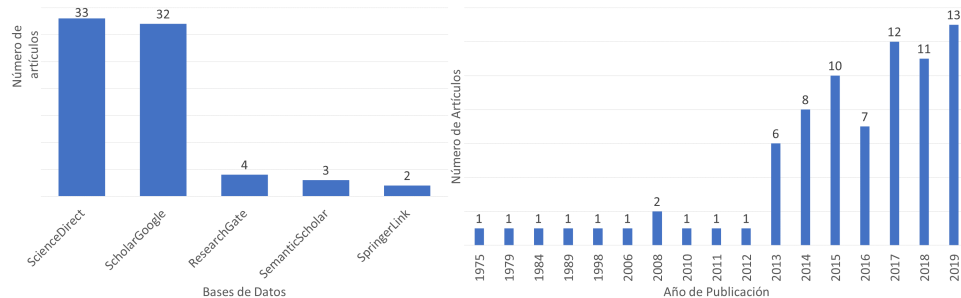


Figura 1. Distribución de los artículos según las bases de datos consultadas y año de publicación

### 3. Modelos

Antes de abordar los modelos combinados, diádicos y tríadicos, es importante brindar un contexto sobre los modelos individuales. Un problema de localización abarca una decisión estratégica, la cual consiste en ubicar una instalación entre un conjunto de posibles ubicaciones, cada instalación potencial cuenta con su respectivo conjunto de clientes con demanda por satisfacer. En la CS la ubicación de una instalación busca la mejor relación cobertura/costo [5]. Existen básicamente tres tipos: una sola planta, P-Mediana para ubicar un número  $N$  de instalaciones y P-Hub, los cuales se configuran como nodos conectados por arcos, en los que aparecen dos tipos de instalación: nodos Hub que funcionan como receptores y transmisores, y nodos No-Hub que se configuran como nodos receptores o transmisores, es decir origen o destino final de la CS [6]. El problema de localización, al ser un modelo general de la CS, tiene una relación directa con los modelos de inventario y ruteo, donde los costos de los mismos dependen en gran medida de la ubicación de la instalación.

Los modelos de inventario buscan determinar la gestión de los pedidos en términos de cantidad y tiempo con el fin de satisfacer las necesidades del cliente al menor costo posible [4], en este modelo se tienen en cuenta las variables de la cantidad de pedido ( $Q$ ), el tiempo  $T$  que indica cada cuanto pedir y un punto de reorden  $R$ , el cual es el nivel de stock indicador para realizar una nueva orden. Los modelos de inventario influyen en las decisiones que toman las organizaciones para asegurar el flujo oportuno de los productos a través de la CS.

El problema de ruteo VRP (por su sigla en inglés, Vehicle Roting Problem) consiste en asignar una flota  $N$  de vehículos a un número  $M$  de clientes que se encuentran ubicados en diversos puntos geográficos, con el fin de que cada demanda sea atendida incurriendo en el menor costo de transporte. Generalmente, los modelos VRP pueden considerar una flota de uno o múltiples vehículos que pueden compartir la misma capacidad o diferentes. Esto bajo la premisa de que en una ruta se debe cumplir la restricción de que un vehículo inicia y finaliza su recorrido en un centro de distribución y la demanda a satisfacer es menor o igual a la capacidad de la flota asignada a dicha ruta [7].

Históricamente, los problemas de gestión de inventarios, ubicación de instalaciones y ruteo eran considerados por separado en la literatura. No obstante, con la evolución de la investigación en el campo, los tres *drivers* logísticos en la gestión de la cadena de suministro (GCS) están relacionados. En el presente se realiza la taxonomía y descripción de los modelos diádicos: Location

Inventory Problem (LIP), Inventory Routing Problem (IRP) y Location Routing Problem (LRP) y posteriormente los modelos tríadicos Location Inventory Routing Problem (LIRP). Para cada grupo de modelos se realiza una breve introducción y descripción al modelo, su clasificación y taxonomía, resaltando los componentes relevantes en escenarios estocásticos. Dado que los trabajos presentan características similares en la función objetivo y métodos de solución, se destina un aparte para estos dos ítems.

### 3.1. Modelos combinados: diádicos

En este aparte se presentan los modelos diádicos de localización-inventario (LIP), inventario-ruteo (IRP) y localización-ruteo (LRP).

#### 3.1.1. Modelos LIP

En los modelos Location Inventory Problem (LIP) se consideran decisiones estratégicas y tácticas, estos buscan determinar la ubicación para instalar uno o más centros de distribución y luego la asignación de cada minorista a un centro de distribución (CD), también se determina con qué frecuencia ordenar en cada CD, se establecen los niveles de inventario a un mínimo costo total de localización e inventario, y se asegura un nivel específico de servicio [8]. Miranda y Garrido [9] plantean un modelo LIP en un entorno en el que los clientes, cada uno con una demanda estocástica, son asignados a CD, si se asigna un cliente a un CD la instalación puede satisfacer una proporción de la demanda del cliente. La demanda que no satisface el CD asignado puede ser asumida por otra instalación, por lo que, dependiendo de la capacidad y su estado, se decide qué demanda cubre.

##### 3.1.1.1. Taxonomía LIP

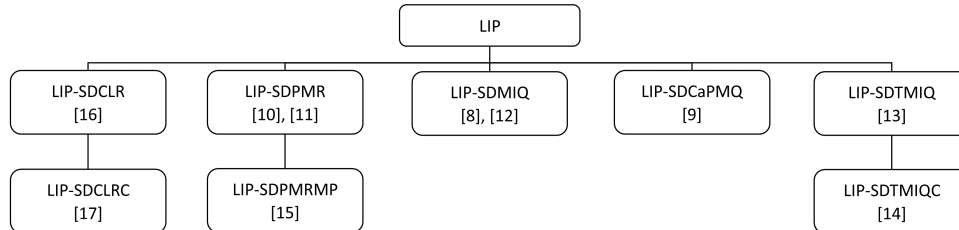
La Tabla III muestra 10 artículos de modelos estocásticos de localización-inventario, se presenta el tipo de modelo, las características y variables estocásticas. Para los modelos LIP se encontró que los problemas de asignación P-Mediana con política de inventario Q,R son los más empleados en la literatura, se evidencia que la adición de la variante P-Hub incrementa la complejidad del modelo mayor a modelos P-Mediana [8]. La demanda es la variable estocástica más trabajada en los modelos, en la práctica la demanda es variable en el tiempo.

En la Figura 2 se observa la taxonomía de los modelos LIP con base en sus características. Los modelos se clasificaron, de una parte, en aquellos con demanda estocástica (SD), configuración Closed-Loop (CL) y política de revisión periódica (R), este modelo será llamado SDCLR, un problema LIP que considera las características anteriormente mencionadas y el SDCLRC, al considerar además la capacidad (C), en el modelo. El segundo tipo es el SDPMR, que considera un problema de P-Mediana con SD y política R para un solo periodo, como derivado de este está el SDPMRMP para múltiples periodos. El tercer tipo son los problemas SDMIQ, que consideran una política de revisión continua (Q), la ubicación de múltiples instalaciones (MI). El SDCPMQ, a diferencia de los demás modelos, considera la demanda y las restricciones de capacidad inciertas (SDCa). La última clasificación propuesta es de los modelos SDTMIQ, con demanda y tiempo estocástico (SDT), con MI y una política Q, al considerar la capacidad en el problema serían SDTMIQC. Cada artículo se incluye en la categoría correspondiente, según sus características presentadas.

**Tabla III.** Taxonomía LIP, tipo de modelo, características y estocasticidad

Referencia	Año	ASPECTOS TRATADOS EN EL ARTÍCULO														
		TM - LOCALIZACIÓN					TM - INVENTARIO				CARACTERÍSTICAS			ESTOCASTICIDAD		
		PMED	PHUB	ASG	MINS	MPD	Q, R	R, T	S, S (R, T)	(s-1, S) (R, Q)	CA	NO CA	CCER	DEM	T	CA
[10]	1975	X			X			X						X		
[11]	1979	X			X											
[9]	2006	X			X		X				X			X		X
[8]	2008		X		X		X							X		
[12]	2015	X		X			X				X			X		
[13]	2016	X			X		X		X		X			X	X	
[14]	2017			X	X		X				X			X	X	
[15]	2018	X		X	X	X		X	X		X			X		
[16]	2018			X	X			X			X		X	X		
[17]	2019			X	X			X			X		X	X		
TOTAL		6	1	5	9	1	5	4	1	1	3	4	2	9	2	1

**Notación:** PMED: P-Mediana; PHUB: P-Hub; ASG: Asignación; MINS: Múltiples instalaciones; MPD: Múltiples periodos; Q,R: Revisión continua; R,T: Revisión periódica; CA: Capacitado; NOCA: No capacitado; CLSC: Circuito cerrado; DEM: Demanda; T: Tiempo; CA: Capacidad.



**Figura 2.** Taxonomía para el LIP estocástico

### 3.1.1.2. Tipos de modelo - política Q,R y R,T

Respecto a los modelos de revisión periódica R,T y continua Q,R, You y Grossmann [8] y [9] adoptan la política Q,R y asumen que las instalaciones no tienen restricciones de capacidad, puesto que podría sesgar el problema al momento de establecer el valor de [8] establecido que todos los clientes son similares y la demanda está determinada por una distribución normal, por lo que comparten la misma media y varianza, mientras que Hui Qu *et al.* [12] establecen que cada cliente es independiente, proponen un modelo para un conjunto de clientes distribuidos aleatoriamente, los cuales deben ser agrupados en subconjuntos para ubicar un CD para un subconjunto, con la limitante de que un CD no puede servir a clientes de otros subconjuntos. Por su parte, Das [10]

desarrolla un modelo de ubicación de dos instalaciones que tienen un sistema de inventario que revisa periódicamente R,T con fines de reposición y redistribución de existencias, el stock puede transferirse de una ubicación a otra solo una vez en cada periodo.

**3.1.1.3. Tipos de modelo - múltiples periodos**

Amiri *et al.* [15] trabajan el problema de localización con múltiples periodos, teniendo en cuenta que las decisiones de ubicación, apertura y cierre de instalaciones van de la mano con una planificación de escenarios e integra la necesidad de establecer los periodos, en los que se hace necesaria la instalación, además planifican el inventario con políticas de orden de pedido, con el fin de enfrentar la incertidumbre de las demandas que fluctúan en múltiples periodos. La Figura 3 muestra la frecuencia de uso de los modelos de LIP, los modelos utilizados para inventario, compuestos por cuatro subconjuntos y los modelos de localización con cuatro subconjuntos. En inventarios, el 55,5 % de los autores trabaja con modelos Q,R, mientras que el 44,5 % los desarrolla con modelos de revisión periódica (R,T); a su vez, el 63 % de los mismos abarca modelos de localización P-Mediana, de los cuales el 54,4 % trata de asignar los clientes a las respectivas instalaciones.

**3.1.1.4. Características - tipo de planta**

Los modelos múltiples son clasificados en P-Hub o P-Mediana. [10] plantea un modelo P-Mediana en el cual se requiere ubicar dos plantas con demanda aleatoria, para mayor cobertura de clientes posibles con modelo de ubicación de múltiples plantas, en la que se realiza una asignación de conjunto de clientes están los modelos de [9], [10], [12], Karmarkar [11]. Otros autores plantean modelos P-Hub divididos en dos etapas, la asignación de los CD a los proveedores, y de los proveedores a los minoristas, en este modelo los CD serían los nodos Hub, los cuales deben tener en consideración la política de inventario, ya que debe conectar la demanda de los clientes minoristas con la oferta del proveedor [8].

**3.1.1.5. Características - capacitados o no**

Miranda y Garrido [9] desarrollaron un modelo de localización e inventario en el que la capacidad de los CD y la demanda de los clientes son estocásticas, busca una solución factible que logre un nivel de servicio determinado al menor costo. Mientras, [12] resuelven un problema con instala-

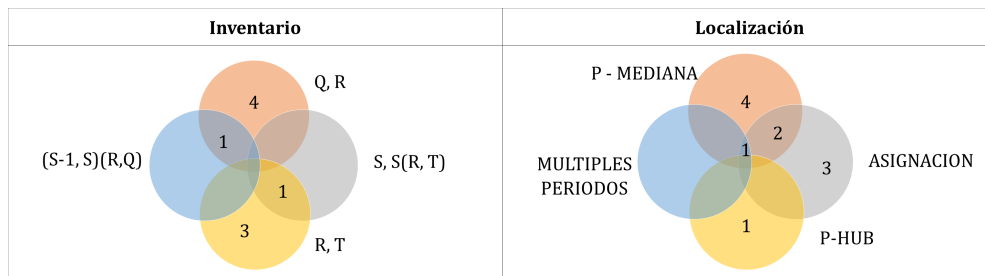


Figura 3. Frecuencia de uso de tipos de modelo de localización-inventario

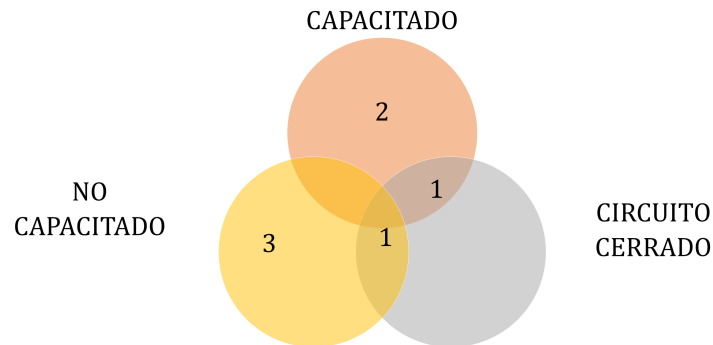


Figura 4. Frecuencia de uso de características de modelos LIP

ciones sin limitaciones de capacidad ni envío, por lo que el costo no es relevante con respecto a la cantidad de transporte, la reposición es permanente y articulada, cada cliente es asignado a un único centro de distribución. La Figura 4 muestra las publicaciones que consideran las características de los modelos LIP y su frecuencia de uso, el 42,8 % de los modelos tiene capacidad limitada en sus instalaciones, el 57,1 % se enfoca en modelos no capacitados y el 28,6 % desarrolla sus modelos sobre circuitos cerrados.

En la Tabla IV se presenta la clasificación de los modelos de LIP según función objetivo y métodos de solución, se nota que todos los modelos se centran en minimizar el costo en el que el 20 % de ellos trabaja funciones multiobjetivo en las que se tiene en cuenta aumentar el nivel de servicio, el cual es impactado por demandas insatisfechas.

Actualmente los modelos de LIP buscan aplicarse a CS multieslabón de bucle cerrado, con una planta híbrida de producción, posibles candidatos a CD y recolectores basados en un modelo de subcontratación con un operador logístico (3PL) [16]. En cuanto a la aplicabilidad del modelo en la CS se aborda el proceso de logística inversa en el cual los CD tienen la capacidad de recolectar productos no conformes. Cuando un modelo implica una CS de bucle cerrado, hace referencia a que la CS es bidireccional, en una dirección se distribuyen los bienes hacia el cliente, en la otra, el cliente envía al centro de manufactura, a través de los CD, productos no conformes o remanentes para ser reprocesados [17]. A nivel de la CS, estos modelos permiten avanzar en el desarrollo de una economía circular, al incentivar el consumo responsable y permitir que el cliente pueda disminuir su huella de carbono y cooperar con la fábrica para recolectar insumos para ser reprocesados. Estos modelos no solo ofrecen una alternativa más limpia, también que un cliente no conforme pueda hacer una devolución y reposición de manera rápida y eficiente.

### 3.1.2. Modelos LRP

Cuando se abordan los problemas de localización-ruteo se hace referencia a la toma de decisiones estratégicas y operativas, la combinación de los dos modelos puede converger a un menor costo [18]–[20]. Laporte *et al.* [21] plantean que en el modelo LRP surgen dos niveles de decisión, primero ubicar las instalaciones cuya cobertura y distancia hacia los clientes sean las mejores, lue-

**Tabla IV.** Taxonomía LIP, función objetivo y métodos de solución

Autores	Año	ASPECTOS TRATADOS EN EL ARTÍCULO									
		F OBJETIVO		METODOS DE SOLUCIÓN							
		MIN CS	N SERV	PE2N	PM	LGRN	AG	RS	AED	ME	ADA
[10]	1975	X			X						
[11]	1979	X									
[9]	2006	X	X			X					
[8]	2008	X	X		X						
[12]	2015	X					X				X
[13]	2016	X								X	
[14]	2017	X						X			
[15]	2018	X		X							
[16]	2018	X							X		
[17]	2019	X								X	
<b>TOTAL</b>		<b>10</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>

**Notación:** MIN CS: Minimizar costo; N SERV: Nivel de servicio; PE2N: Programación estocástica de dos niveles; PM; Programación matemática; LGRN: LaGrange; AG: Algoritmo genético; RS: Recosido simulado; AED: Algoritmo autoadaptativo basado en evolución diferencial; ME: Métodos exactos; ADA: Algoritmo desarrollado por el autor.

go se procede a plantear el ruteo de los vehículos, a menor distancia entre el CD y los clientes, los costos de ruteo serán más bajos y el nivel de servicio aumentará. Generalmente los modelos restringen la posibilidad de libre ubicación de las instalaciones, acotándolas a un conjunto de ubicaciones candidatas con el fin de adaptarlo a una situación real [22], [23]. Naturalmente el LRP pertenece a los problemas NP-Hard, dado que el espacio de soluciones aumenta exponencialmente con la expansión del problema [24].

### 3.1.2.1. Taxonomía LRP

En la Tabla V se muestran 12 artículos dedicados al estudio de modelos estocásticos de localización-ruteo, se resalta el tipo de modelo, las características y variables estocásticas. En la tabla se encuentran como mayor porcentaje de participación los modelos de múltiples instalaciones, ya que agregan al problema de Location-Routing un número de posibles rutas desde los diferentes centros de distribución. Los modelos de un solo tipo de vehículo se pueden considerar obsoletos para la representación de un sistema actual; sin embargo, son pocos los que trabajan con flotas heterogéneas.

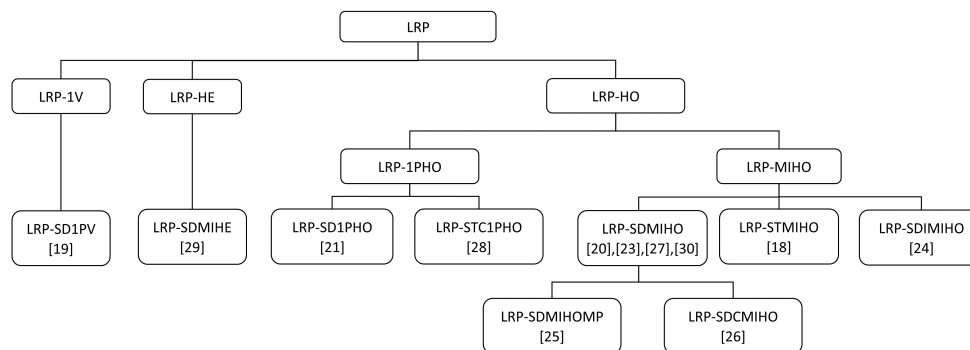
En la Figura 5 se presenta la clasificación para los modelos LRP, la gráfica cuenta con tres niveles. El primer nivel hace referencia al tipo de flota considerada: un solo vehículo (1V), flota heterogénea (HE) y flota homogénea (HO). En el segundo nivel se encuentran las características de localización como una planta (1P) y múltiples instalaciones (MI). En el tercer nivel se encuentra la estocasticidad que presenta el modelo, si es en demanda (SD), tiempo (ST), distancia (SDI), tiempo y costo (STC), demanda y costo (SDC). Por último, en el modelo SDMIHO hay un trabajo que

**Tabla V.** Taxonomía LRP, tipo de problema, características y estocasticidad

REFERENCIAS	AÑO	ASPECTOS TRATADOS EN EL ARTÍCULO															
		LOCALIZACIÓN				VRP			CARACTERÍSTICAS					ESTOCASTICIDAD			
		1 - P	AS	MI	MP	VRPSD	VRPSDC	VRPTT	CA	PDNS	1V	MVHOM	MVHET	DEM	T	DIST	CS
[21]	1989	X	X			X			X			X		X			
[20]	2013		X	X		X			X			X		X			
[8]	2013		X	X				X	X			X			X		
[25]	2014		X	X	X	X			X			X		X			
[19]	2015	X	X				X		X		X			X			
[26]	2015		X	X		X			X			X		X			X
[23]	2015		X	X		X			X	X		X		X			
[27]	2015		X	X		X			X	X		X		X			
[24]	2016		x	x		X			x			x				X	
[28]	2017	X						X	X			X			X		X
[29]	2019		X	X		X			x	X			X	X			
[30]	2019		X	X		X			X			X		X			
<b>TOTAL</b>		<b>3</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

**Notación:** 1P: Una planta; AS: Asignación; MI: Múltiples instalaciones; MP: Múltiples periodos; CA: Capacitado; PDNS: Penalización por demanda no satisfecha; 1V: Un vehículo; MVHOM: Flota homogénea; MVHET: Flota heterogénea; DEM: Demanda; T: Tiempo; DIST: Distancia; CS: Costo.

considera múltiples periodos y otro que incluye estocasticidad en los costos. Cada trabajo de LRP fue clasificado según sus características. Se ve que en la literatura revisada no hay trabajos de flota heterogénea que consideren otros parámetros estocásticos además de la demanda.



**Figura 5.** Taxonomía para el LRP estocástico

### 3.1.2.2. Tipos de modelo

Borges *et al.* [22] plantean una taxonomía respecto a los modelos LRP con incertidumbre; la tipología para LRP que se propone es una combinación de los modelos de localización y ruteo, se basa en el número de instalaciones y en parámetros estocásticos. De la bibliografía existente entre 2013 y 2019, se pueden plantear tres grupos de modelos. *VRPSDC - 1 planta*: describe una familia de problemas de ubicación y enrutamiento estocástico que ubican simultáneamente un depósito entre un conjunto de sitios potenciales, la demanda o los clientes pueden tener comportamientos aleatorios, con el objetivo de que la instalación proporcione cobertura a la mayoría de clientes y las distancias sean mínimas [19], [21]. *VRPSD - múltiples instalaciones*: aborda simultáneamente dos problemas, la ubicación de las instalaciones y el diseño de las rutas de viaje para vehículos entre las instalaciones establecidas y los puntos de demanda existentes, contempla la demanda aleatoria por lo que la ubicación de las instalaciones debe cumplir las restricciones de cobertura y capacidad al igual que la flota de vehículos [20], [23], [27]. *VRPSTT - múltiples instalaciones*: es un modelo para un entorno dinámico, se consideran factores de tráfico aleatorios y cíclicos, con el objetivo de determinar la solución óptima a través del tiempo, Gao *et al.* [24] proponen un modelo de localización-asignación con múltiples plantas capacitadas, una flota de vehículos con capacidad homogénea y un factor de congestión vehicular alto, medio o bajo; lo que se traduce en tiempos de viaje inciertos entre las ubicaciones de los clientes. Otro tipo de modelos son los difusos, obtienen mejores resultados cuando los estocásticos no funcionan al ser desconocida o parcialmente conocida la distribución de probabilidad de los parámetros, lo que implica la inclusión de expertos. Wei *et al.* [26] proponen un modelo de programación con restricciones de oportunidad credibilista (CCP) con el objetivo de encontrar el mejor equilibrio entre el riesgo y el costo de transporte de materiales peligrosos bajo los supuestos de que el costo de transporte y el número de personas son variables difusas.

La Figura 6 muestra la frecuencia de uso de los modelos de LRP, al lado izquierdo los modelos utilizados para localización, compuesto de cuatro subconjuntos y al lado derecho los modelos de ruteo con tres subconjuntos.

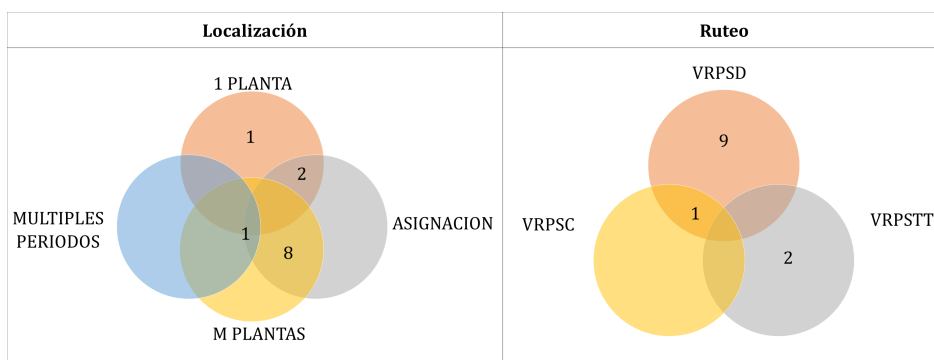


Figura 6. Frecuencia de uso de tipo de modelos LRP



En localización, el 69,2 % de los autores trabaja con modelos de múltiples plantas, mientras que el 23 % los desarrolla con modelos de una sola planta; a su vez, el 83 % de los mismos abarca modelos de ruteo con demanda estocástica, mientras uno contempla que la aparición de clientes también presente aleatoriedad.

### 3.1.2.3. Características - vehículos y capacidad

Respecto a la característica de vehículos se plantean tres grupos: aquellos que cuentan con un solo vehículo [19], los que tienen una cantidad  $M$  de vehículos que pueden ser homogéneos [21], [23], [27] y los de flota heterogénea [29]. El modelo LRP puede contemplar dos restricciones de capacidad: en la planta y en el vehículo [22], algunos autores, para reducir la complejidad del problema, solo asignan capacidad a uno de los dos, ya sea a los vehículos o a la planta. En [19], [21] y [20] plantean modelos con una flota de vehículos idénticos de un proveedor externo que envían los productos, hay un máximo  $M$  vehículos disponibles, cada vehículo es responsable de un solo viaje de entrega y la capacidad de cada vehículo está determinada. Por su parte, Nadizadeth *et al.* [25] presentan un modelo con capacidad limitada de vehículos e instalaciones, y demandas difusas para asignación adecuada de rutas y depósitos. Borges *et al.* [22] postulan un modelo con un conjunto de instalaciones potenciales capacitadas, en el cual se asignan dos conjuntos de rutas independientes para entrega y recogida.

La Figura 7 muestra la cantidad de publicaciones que consideran las características de los modelos de LRP. Se evidencia que el 83,3 % de los modelos cuenta con una flota de múltiples vehículos similares, el 25 % agrega costos de penalización por demanda insatisfecha y uno de los autores desarrolla un modelo LRP con un solo vehículo. En la Tabla VI se presenta la clasificación de los modelos de LRP según función objetivo y métodos de solución.

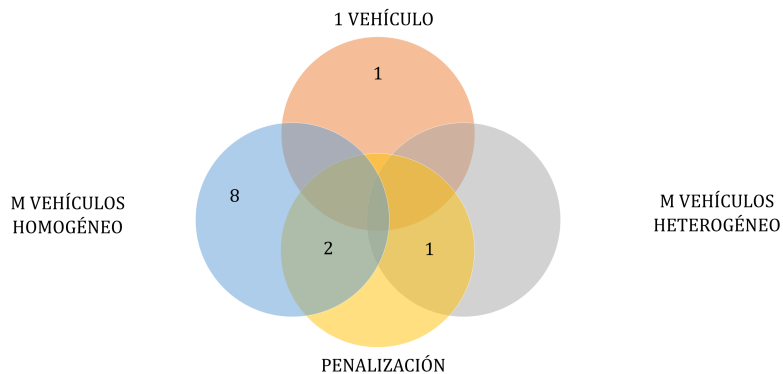


Figura 7. Frecuencia de uso de características de modelos LRP

El avance de los modelos de Location-Routing facilita a las organizaciones el desarrollo de CS sostenibles, permitiendo aplicar tecnologías más limpias. En [30] desarrollaron un modelo de LRP

**Tabla VI.** Taxonomía LRP, función objetivo y métodos de solución

REFERENCIAS	AÑO	ASPECTOS TRATADOS EN EL ARTÍCULO																			
		F OBJETIVO					MÉTODOS DE SOLUCIÓN														
		MIN CS	MIN D	RS	SC	AMB	PM	PL	LGR	ABAG	ABOE	RS	TB	SIM	A GEN	D BEN	ACH	ABLI	ABEV	HAB	A P
[21]	1989	X					X														
[20]	2013	X											X							X	
[18]	2013	X													X						
[25]	2014	X	X				X						X							X	
[19]	2015	X			X		X	X													
[26]	2015	X		X						X			X								
[23]	2015	X						X	X									X			
[27]	2015	X										X									
[24]	2016	x				X					X			X		X					
[28]	2017	X											X			X					
[29]	2019	X															X	X	X		
[30]	2019	X								X	X			X			X	X		X	
<b>TOTAL</b>		<b>12</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

**Notación:** MIN CS: Minimizar costo; MIN D: Minimizar distancia; RS: Riesgo; SC: Social; AMB: Ambiental; PM: Programación matemática; PL: Programación lineal; LGR: LaGrange; ABAG: Algoritmo basado en algoritmos genéticos; ABDE: Algoritmo basado en optimización por enjambre de partículas; RS: Recosido simulado; TB: Búsqueda tabú; SIM: Simulación; A GEN: Algoritmo genético; DBEN: Descomposición de Benders; ACH: Algoritmo de colonia de hormigas; ABU: Algoritmo de búsqueda local iterativa; ABEV: Algoritmo de búsqueda de entorno; HAB: Heurística basada en algoritmo de búsqueda; AP: Algoritmo desarrollado por el autor.

con demanda estocástica en el cual la flota de vehículos es eléctrica, el problema se centra en suplir la demanda de los clientes y ubicar las estaciones de cambio de batería, dado que los vehículos cuentan con una capacidad limitada de mercancía y de batería, lo cual limita la distancia que pueden recorrer entre los nodos, ya sean clientes o estaciones de carga. En términos de la evolución de los modelos logísticos, se encuentra el interés futuro de trabajar en sostenibilidad y objetivos ambientales de problemas aplicables a CS, en los cuales el objetivo trasciende a desarrollar métodos de entrega que disminuyan la emisión de CO<sub>2</sub>.

### 3.1.3. Modelos IRP

Los modelos Inventory Routing Problem datan de hace 30 años, inicialmente se plantearon modelos de VRP añadiendo consideraciones de costos de inventario a los costos de transporte [31]–[33]. La metodología de los modelos IRP se basa en la toma de tres decisiones específicas: cuándo atender a los clientes, bajo qué rutas se distribuirán los vehículos, y cuánto se debe enviar a cada uno y almacenar en los depósitos [32], [34], [35]. Los métodos de optimización para IRP estocásticos requieren información acerca de los niveles de inventario actuales e históricos, el comportamiento de la demanda, la ubicación de los nodos, los costos de transporte, así como la capacidad y dis-

ponibilidad de vehículos y conductores. La elección de la política de inventario influye de forma significativa en el costo del proceso de optimización [36].

### 3.1.3.1. Taxonomía IRP

En la Tabla VII se muestran 20 artículos dedicados al estudio de modelos estocásticos de IRP en los que se presenta la taxonomía, resaltando el tipo de modelo, las características y variables estocásticas. Se encuentra que la mayoría de trabajos aplicados a Inventory-Routing se enfoca en modelos de ruteo con demanda estocástica y una política de inventario R,T; frente a los modelos estudiados anteriormente, los IRP contienen mayor número de trabajos con flota de vehículos heterogénea. La demanda sigue siendo la variable estocástica predominante.

**Tabla VII.** Taxonomía IRP, tipo de modelo, características y estocasticidad

REFERENCIA	AÑO	ASPECTOS TRATADOS EN EL ARTÍCULO															
		TIPO DE MODELO-VRP			T DE M - INVENTARIO			CARACTERÍSTICAS							EST.		
		VRPSD	VRPDC	VRPSTT	Q,R	R,T	S,S(R,T)	CA	TR	PDNS	TTR	IV	MVHOM	MVHET	EP	DEM	T
[33]	1984	X			X			X					X			X	
[37]	2014	X				X		X					X			X	
[38]	2014	X			X			X					X			X	
[39]	2015		X					X					X			X	
[40]	2015	X				X		X					X			X	
[41]	2015	X			X			X					X			X	
[42]	2015	X				X	X	X		X			X			X	
[43]	2016	X				X		X					X			X	
[44]	2015	X				X		X	X				X	X		X	
[45]	2017	X				X		X					X			X	
[46]	2017	X				X		X	X				X			X	
[47]	2017	X						X					X			X	
[48]	2017	X				X		X					X			X	
[49]	2017	X				X		X	X				X			X	X
[35]	2018	X					X	X					X			X	
[50]	2018	X		X		X		X					X			X	X
[51]	2019	X				X		X					X			X	
[52]	2019	X						X			X					X	
[53]	2019	X				X		X					X			X	
[54]	2019	X				X		X					X			X	
<b>Total</b>		<b>19</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>20</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>14</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>20</b>	<b>2</b>

**Parámetros** VRPSD: Demanda estocástica; VRPSC: Clientes estocásticos; VRPDC: Demandas y clientes estocásticos; VRPSTT: Ventanas de tiempo estocásticas; DIN: Dinámico; CA: Capacitado; TR: Trasbordo; PDNS: Penalización demanda no satisfecha; TTR: Tercerización de transporte; IV: 1 vehículo; MVHO: múltiples vehículos flota homogénea; MVHET: múltiples vehículos flota heterogénea; RyE: Recogida y entrega; EP: Entregas parciales; DE: Demanda; T: Tiempo.

En la Figura 8 se muestra la clasificación resultante para los modelos IRP. Al igual que con la gráfica del modelo anterior, posee tres niveles. En el primero se encuentra el tipo de flota: 1V, heterogénea (HE) y homogénea (HO). En el segundo nivel se encuentra el tipo de política de inventario, si es de revisión continua (Q) o si es revisión periódica (R). En el tercer nivel se encuentran los parámetros estocásticos nombrados como SD para demanda y SDT para demanda y tiempo. Por último, se encuentran modelos que consideran políticas de ruteo tales como trasbordos (TR), tercerización de la flota (TE) y entregas parciales (EP). En la literatura revisada no se encuentran modelos que consideren política Q y tengan políticas de ruteo, también hay ausencia de modelos con política Q considerando el tiempo estocástico.

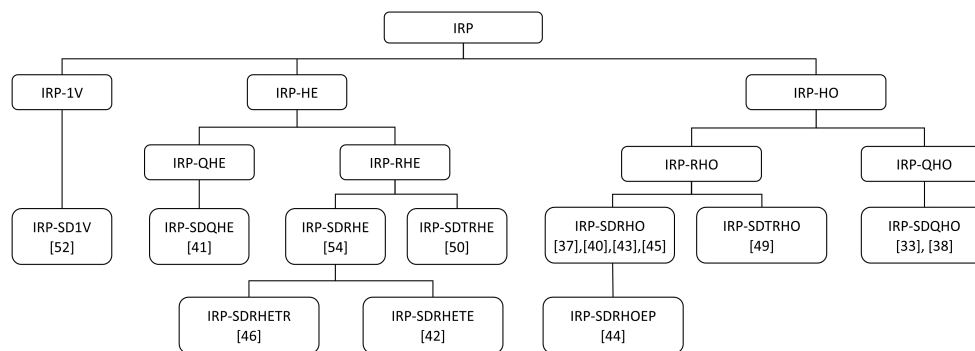


Figura 8. Taxonomía para el IRP estocástico

### 3.1.3.2. Tipos de modelo

Autores como Roldán *et al.* [36] y Mosca *et al.* [55] señalan que en los trabajos IRP estocásticos se distinguen dos grupos, el primero añade limitaciones de inventario para el problema del transporte, mientras el otro considera el vehículo como el “productor” del inventario. Los modelos IRP se pueden clasificar con base en la toma de decisiones según: *VRPSD - Q,R*: plantea la generación de rutas de uno o varios depósitos para satisfacer la demanda del cliente, considerando una política de reorden continua. De otra parte, los modelos de colas y procesos markovianos se han utilizado ampliamente para representar sistemas de inventarios, en especial cuando se considera un único proveedor, con frecuencia se utiliza el sistema *M/M/1*, en el que las demandas llegan con una distribución Poisson y los tiempos de servicio son representados por una distribución de probabilidad exponencial [36]. *VRPSD R,T*: este tipo de modelado es el más común, ampliamente usado en CS alimentarias, el ritmo de reorden hace que sea fácil tomar decisiones operativas [56] y [57]. Onggo *et al.* [51] y Crama *et al.* [45] plantean el problema multiperiodo con productos perecederos en donde se implementa una política de reabastecimiento (R,T) y de distribución con toma de decisión centralizada (VMI), incluyen la distribución de la demanda y la relación de equilibrio entre el costo de enrutamiento, y el costo del desperdicio. La Figura 9 muestra el uso de los modelos IRP. El 82,3 % de los autores establece una política de inventario de revisión continua, el 17,7 % restante los desarrolla con modelos Q,R, todos los autores trabajan con demanda estocástica, de

ellos el 70 % lo desarrolla con flota de vehículos múltiples homogéneos, mientras el 25 % cuenta con flota múltiple heterogénea, el 5 % restante trabaja en modelos con un solo vehículo.

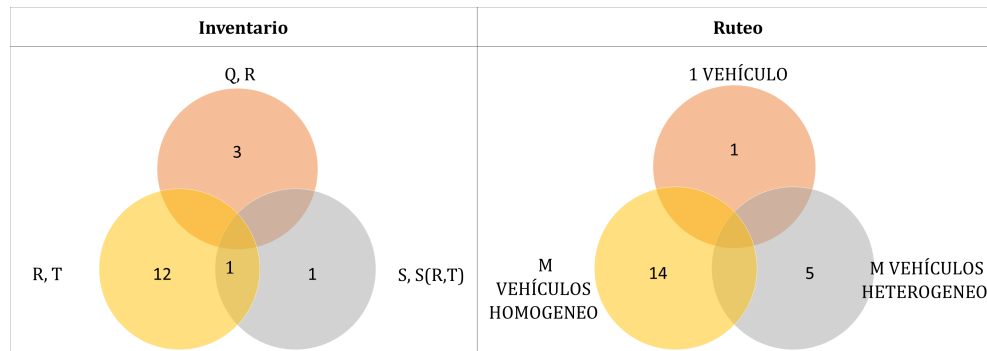


Figura 9. Frecuencia de uso de tipo de modelo IRP

### 3.1.3.3. Características - capacidad y flota

En su mayoría los modelos IRP son capacitados, los modelos de inventario tienen un nivel máximo de almacenamiento y contemplan dos tipos de capacidad: en almacén con nivel máximo de inventario y la flota con o sin restricciones de capacidad [35]. Brinkmann *et al.* [39] plantean un modelo de distribución de bicicletas con un nivel máximo de inventario (portabicicletas) y con  $M$  vehículos, se debe garantizar un número de portabicicletas vacío para que puedan ser parqueadas. Yadollahi *et al.* [53] plantean métodos de solución para modelos estocásticos con flota de capacidad limitada e inventario máximo, y Rossi *et al.* [52] un modelo capacitado para centros de combustible y vehículos para ruteo. Coelho *et al.* [32] describen un modelo con un número  $M$  de vehículos homogéneos que realizan una ruta por periodo de tiempo. Por su parte Nikzad *et al.* [54] y Niakan y Rahimi [41] plantean modelos con vehículos heterogéneos, capacidades y costos diferentes, para agregar complejidad en la asignación de vehículos a las rutas. Mientras Yadollahi *et al.* [47] y Rahbari *et al.* [49] trabajan con una flota homogénea que sale del mismo depósito hacia un conjunto  $N$  de clientes minoristas. Se evidencia gran interés por desarrollar mejores métodos de solución, Crama *et al.* [45] plantean una política de ordenamiento sencilla con buen desempeño, mejoras estadísticas y económicas significativas, que se logran cuando se utilizan métodos de solución más avanzados. Solo un trabajo tenía restricción de ventanas de tiempo, aunque deterministas [50]. En la Tabla VIII se presenta la clasificación de los modelos de IRP según función objetivo y métodos de solución.

El enfoque de programación estocástica de dos etapas para problemas Inventory-Routing generalmente incluye las variables de decisión de inventarios en la segunda etapa, lo cual aumenta el número de restricciones con parámetros inciertos y el número de variables específicas; en su lugar, considerar las desviaciones en las restricciones como variables de segunda etapa genera robustez al modelo y se disminuye el tiempo de cálculo [54]. Además, al comparar el modelo propuesto con dos modelos clásicos, uno sin restricciones y otro con restricciones probabilísticas, se demuestra

**Tabla VIII.** Taxonomía IRP, función objetivo y métodos de solución.

REFERENCIA	AÑO	ASPECTOS TRATADOS EN EL ARTÍCULO																	
		F OBJETIVO					METODOS DE SOLUCIÓN												
		MIN CS	MIN T	MIN D	N SERV	AMB	P E 2 N	OP R	P M	D LGR	R SIM	D B	H AD	SIM	AEBD	HDFBD	ABLI	ME	HAB
[33]	1984	X												X	X				
[37]	2014	X							X								X		
[38]	2014	X										X							
[39]	2015				X			X											
[40]	2015	X									X						X		
[41]	2015	X			X	X		X											
[42]	2015	X										X					X		
[43]	2016	X						X									X		
[44]	2015	X							X										
[45]	2017	X												X					
[46]	2017	X				X	X												
[47]	2017	X											X						
[48]	2017	X			X								X				X		
[49]	2017	X						X					X						
[35]	2018	X											X					X	
[50]	2018	X								X								X	
[51]	2019	X											X			X		X	
[52]	2019		X	X					X										
[53]	2019	X						X										X	
[54]	2019	X					X		X										
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>2</b>

**Notación:** MIN CS: Minimización de costo; MIN T: Minimización de tiempos; MIN D: Minimización de distancia; N Ser: Nivel de servicio; AMB: Nivel ambiental; P E 2 N: Programación estocástica de dos niveles; OP R: Optimización robusta; DLGR: Descomposición de LaGrange; R SIM: Recocido simulado; D B: Descomposición de Benders; H AD: Algoritmo de despliegue; SIM: Simulación, AEBD: Algoritmo evolutivo basado en descomposición, HDFBD: Heurística de dos fases basada en descomposición, A BLI: Algoritmo búsqueda local interactiva; ME: Métodos exactos; HAB: Heurística basada en algoritmos de búsqueda.

que en condiciones de interrupción de la CS, el modelo propuesto es más sólido. Los enfoques de solución deterministas son eficientes en tiempo, aunque poseen mala calidad en el resultado, pero con una parametrización adecuada es posible mejorar la calidad de estas soluciones, [53] proponen un mecanismo de asignación de stock de seguridad que comparado con el método de solución de aproximación promedio de muestra (SAA) resulta en menor tiempo y costo computacional, en

términos de la CS para instancias de gran escala, se obtiene un resultado apropiado en un tiempo razonable.

### 3.2. Modelos triádicos: LIRP

Correspondiente a la combinación del inventario, localización y ruteo (LIRP, por su sigla en inglés Location-Inventory-Routing Problem), dada su complejidad en cuanto a la temporalidad en el modelado y su naturaleza NP-Hard, los artículos son escasos; a la luz de esta revisión se propone una primera clasificación de estos modelos.

#### 3.2.1. Taxonomía LIRP

La Tabla IX presenta 20 artículos de modelos estocásticos de localización-inventario-ruteo con la taxonomía, resaltando el tipo de modelo, las características y variables estocásticas. En la literatura revisada se encuentra que la mayoría de trabajos se realiza con modelos de múltiples instalaciones, con el objeto de ser aplicables a gran escala en la representación de la CS, los modelos requieren ser capacitados para que las políticas de inventario que se definan se ajusten al tamaño del almacén y a la capacidad de la flota, la decisión de asignación de múltiples instalaciones responde al trabajo de modelos de inventario multieslabón. Igual que los modelos diádicos, la demanda sigue siendo la variable estocástica predominante en los modelos.

En la Figura 10 se muestra la clasificación para los modelos LIRP estocásticos. La gráfica cuenta con cuatro niveles. En el primer nivel se encuentra el tipo de flota: 1V, heterogéneas (HE) y homogéneas (HO). En el segundo nivel esta la política de inventario Q,R. Para el tercer nivel se encuentra que todos los modelos contemplan múltiples instalaciones (MI) y los parámetros estocásticos SD, SDT y SDC. El último nivel incluye características tales como múltiples periodos (MP) y Closed-Loop (CL). Se evidencia que en la literatura consultada no hay trabajos que consideren políticas de ruteo, en este caso no se combina el uso de las políticas R con tiempos inciertos.

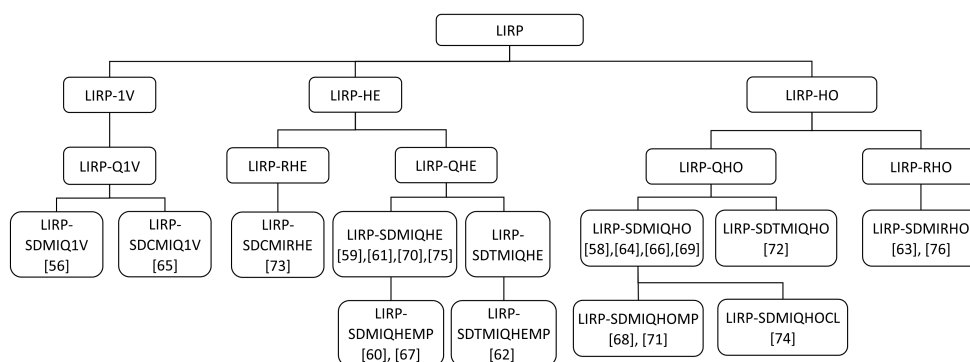


Figura 10. Taxonomía para el LIRP estocástico

**Tabla IX.** Taxonomía LIRP, tipo de modelo, características y estocasticidad

Referencias	Año	ASPECTOS TRATADOS EN EL ARTÍCULO															
		LOCALIZACIÓN			VRP			INVENTARIO			CARACTERÍSTICAS			ESTOCASTICIDAD			
		ASIG	MI	MPER	VRPSD	VRPSDC	VRPTT	Q,R	R,T	(s-1,S) (R,Q)	CA	IV	MVHOM	MVHET	DEM	T	CS
[58]	2010		X								X	X					
[59]	2012	X	X		X			X			X		X	X			
[60]	2014		X	X	X			X			X		X	X			
[61]	2013	X	X		X			X			X		X	X			
[62]	2014	X	X	X	X		X	X			X		X	X	X		
[63]	2014		X			X			X		X	X		X			
[64]	2014	X	X		X						X	X		X			
[65]	2015		X			X		X			X	X					
[66]	2016	X	X		X			X			X	X		X			
[67]	2017		X	X	X						X		X				
[68]	2017	X	X	X	X			X			X	X		X			
[69]	2017	X	X	X	X					X	X	X		X			
[70]	2017	X	X		X			X			X		X	X			
[71]	2017	X	X		X			X		X	X	X		X	X		
[72]	2018	X	X		X			X		X	X	X		X	X		
[73]	2018	X	X		X				X		X		X	X		X	
[74]	2018		X		X			X			X	X					
[75]	2019	X	X		X			X			X		X	X			
[56]	2019		X		X			X			X	X					
[76]	2019	X	X		X				X		X	X		X			
<b>TOTAL</b>		<b>13</b>	<b>20</b>	<b>5</b>	<b>17</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>13</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

### 3.2.2. Clasificación

La mayoría de los artículos son de un solo producto y un periodo de planeación, con horizonte de planeación finito o infinito, no consideran parámetros dinámicos. La Figura 11 muestra los artículos LIRP según el tipo de modelo que presentan en los tres problemas individuales.

El 82,3 % de los autores establece una política de inventario de revisión continua para los modelos IRP, el 17,7 % restante los desarrolla con modelos R,T; teniendo en cuenta el modelo de ruteo, todos los autores trabajan sobre problemas con demanda estocástica, de los cuales el 70 % lo desarrolla con flota múltiple de vehículos homogéneos, mientras el 25 % cuenta con flota múltiple de heterogéneos, el 5 % restante trabaja en modelos con un solo vehículo, un trabajo IRP considera una restricción de ventana de tiempo determinística.

### 3.2.3. LIRP según política de inventario

Los modelos LIRP por definición abordan la CS; sin embargo, la política de inventario puede ser tomada para uno o varios eslabones. De los artículos consultados, el 52 % aplica una política de revisión continua y el 12 % una política R,T, que es aplicada frecuentemente en un solo esla-



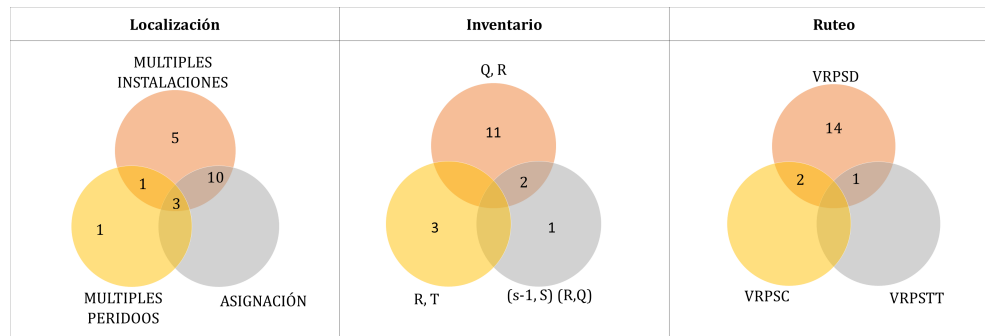


Figura 11. Frecuencia de uso de tipo de modelo LIRP

bón, Rao [77], referenciado en [78], ha demostrado que la política Q,R domina a la R,T por su desempeño de los costos generados a largo plazo.

### 3.2.4. Política R,Q en un único eslabón y varios eslabones

Rayat *et al.* [68] modelan un LIRP estocástico que considera el riesgo de ruptura en el flujo de la CS, representado mediante una probabilidad, con una política de revisión continua para un solo eslabón, múltiples periodos y multiproducto, en donde el reabastecimiento considera un backordering parcial, es decir que parte de las ventas pendientes se pierde y la otra parte se queda como pedido pendiente. Con una estrategia de centralización del inventario y el riesgo, se pueden reducir los efectos negativos de la variabilidad de la demanda de los clientes y alcanzar niveles adecuados de servicio a los clientes, bajo esta premisa Forouzanfar y Tavakkoli [59], Tavakkoli *et al.* [61] modelan un problema LIRP con inventario de revisión continua para un CD. En el mismo sentido, Nakhjirkan y Mokhatab [70] modelan un LIRP para cuatro eslabones, con inventario en el CD. Asadi *et al.* [72] proponen un diseño para la CS con una política s-1,S para el reabastecimiento en dos de los tres eslabones considerados. Se modela como una cadena de Markov con la demanda Poisson y tiempos de entrega desde el proveedor con una distribución exponencial. Con la misma política s-1,S, Dehghani *et al.* [71] plantean un sistema de colas para el inventario, cuyas decisiones son determinar el nivel de inventario y el stock de seguridad para los CD y los minoristas.

### 3.2.5. Política R,T en un eslabón

Eskandari *et al.* [73] desarrollan un modelo de optimización para una CS sostenible multiobjetivo de sangre, multiproducto perecedero, consideran datos inciertos en un desastre natural. Aplican una política de inventario periódico para un eslabón con demanda difusa, demuestran que un incremento en el costo de mantenimiento no tiene un impacto significativo en la función objetivo para este tipo de problema. Saragih *et al.* [76] proponen un modelo, aplicable a problemas de gran escala, con política de inventario ordenar-hasta, en tres eslabones involucrados y demanda con distribución normal, a fin de reducir los costos de escasez y determinar el inventario de seguridad apropiado.

### 3.2.6. Características - modelos capacitados

Los modelos pueden tener restricciones de capacidad en la flota o en los almacenes. Un problema con flota capacitada restringe la cantidad de productos que pueden ser enviados por las diferentes rutas, se debe decidir qué cantidad o número de clientes satisfacer [65]. Rafie *et al.* [67] establecen un modelo cuya flota tiene capacidad limitada para CD que usan vehículos con horario. Ahmadi y Azad [58] proponen un modelo en el que se conocen todos los niveles de capacidad posibles para el conjunto de CD. Por su parte Seyedhosseini *et al.* [64] desarrollan un modelo en el cual se presentan disrupciones aleatoriamente, lo cual puede representar una pérdida de capacidad de la instalación o la indisponibilidad. En la Figura 12 se observa la distribución de los artículos consultados para LIRP teniendo en cuenta el tamaño de la flota.

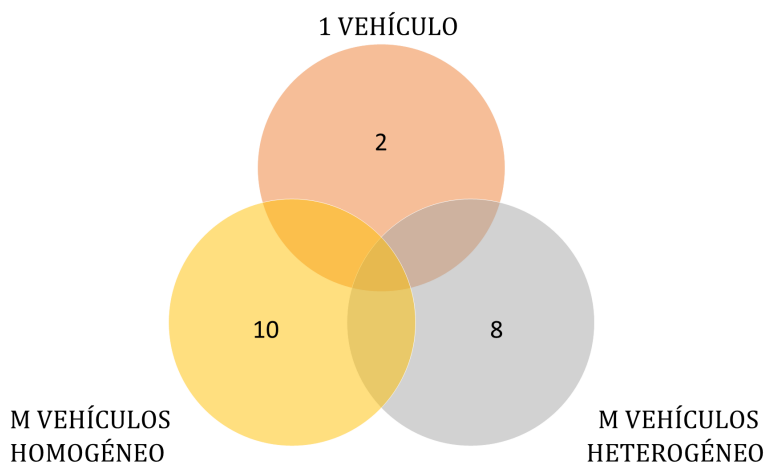


Figura 12. Frecuencia de uso de características de modelo LIRP

La mitad de autores trabaja sobre modelos cuya flota de vehículos es mayor a uno y con características similares (50 %), seguido de modelos con múltiples vehículos y de características diferentes (40 %), solo el 10 % trabaja con problemas de un solo vehículo. En la Tabla X se presenta la clasificación de los modelos de LIRP según función objetivo y métodos de solución.

Las principales limitantes para modelos trídicos de gran escala son la falta de linealidad y el cálculo respecto al enrutamiento de vehículos, por ello, en [56] se implementa un método para reducir la dimensión del problema y un método de solución basado en la descomposición de Benders, lo que resulta computacionalmente mejor que utilizar optimizadores o el algoritmo de aproximación externa (OA). Esto se realiza considerando un solo producto y un solo proveedor; sin embargo, al considerar múltiples productos y proveedores la complejidad aumenta, tanto así que el método de solución propuesto no es eficiente; por tanto, esta propuesta va enfocada a cadenas como autos, redes de comunicación y redes de transporte de agua urbana. [76] también consideran un único producto y único proveedor, además de una flota homogénea; la contribución radica en que las de-

**Tabla X.** Taxonomía LIRP, función objetivo y métodos de solución

Referencias	Año	ASPECTOS TRATADOS EN EL ARTÍCULO																			
		F OBJETIVO						METODOS DE SOLUCIÓN													
		MIN CS	MIN T	RS	SC	N SER	AMB	PM	LGRN	AG	AOEP	AIC	RS	TB	EEP	SIM	AEBD	ME	HAB	ABA	ADA
[58]	2010	X											X		X		X	X			
[59]	2012	X							X								X				
[60]	2014	X				X					X										
[61]	2013	X	X														X				
[62]	2014	X	X						X		X	X		X							
[63]	2014	X	X					X					X					X			
[64]	2014	X						X		X											
[65]	2015	X						X					X								
[66]	2016	X			X		X											X			
[67]	2017	X						X													
[68]	2017	X		X					X	X		X				X	X				
[69]	2017	X							X			X									
[70]	2017	X					X		X								X				
[71]	2016	X										X									
[72]	2018	X					X		X	X							X				
[73]	2018	X			X		X						X				X		X		
[74]	2018	X											X		X					X	
[75]	2019	X					X		X								X				
[56]	2019																X				
[76]	2019	X											X							X	
<b>TOTAL</b>		<b>19</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

**Notación:** MINCS: Minimizar costo; MIN T: Tiempo; RS: Riesgo; SC: Social; N SER: Nivel de servicio; AMB: Ambiental; PM: Programación matemática; LGRN: LaGrange; AG: Algoritmo genético; ADEP: Algoritmo de optimización por enjambre; AIC: Algoritmo imperialista competitivo; RS: Recocido simulado; TB: Búsqueda tabú; EEP: Estrategia de evolución de Pareto; SIM: Simulación; AEBD: Algoritmo evolutivo basado endescomposición; ME: Métodos exactos; HAB: Heurística basada en algoritmos de búsqueda; ABA: Algoritmo de búsqueda de la armonía; ADA: Algoritmo desarrollado por el autor.

cisiones de inventario se realizan en los tres eslabones considerados. Para resolver dicho problema emplean una heurística de dos fases, fase 1: solución inicial y fase 2: mejora de la solución inicial mediante recocido simulado. Estos casos de estudio son modelos difícilmente generalizables; considerar múltiples productos, múltiples proveedores y ventanas de tiempo incrementan considerablemente la complejidad, implicando un reto a investigaciones futuras y hacia los métodos de solución.

## 4. Parámetros Estocásticos

En el siguiente aparte se presenta la distribución de los parámetros estocásticos en los modelos diádicos y tríadicos, la demanda, el tiempo, el costo y la capacidad son algunos de los parámetros más abordados en los modelos logísticos, la Figura 13 muestra la frecuencia de los parámetros estocásticos en cada modelo.

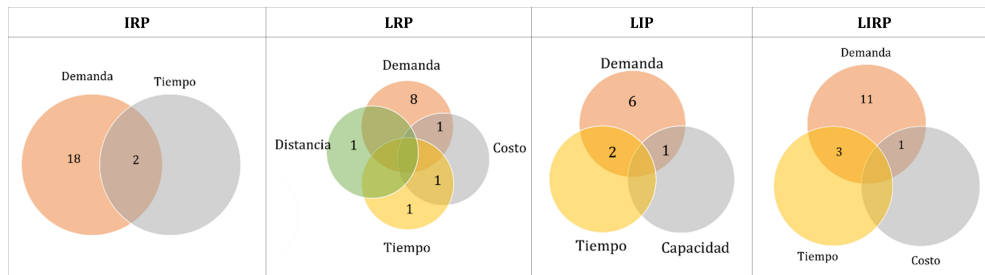


Figura 13. Frecuencia de uso de los parámetros estocásticos en los modelos diádicos y tríadicos

A nivel general, la demanda es el parámetro estocástico más común en los modelos diádicos, pues en el 85 % de los artículos revisados esta es la variable principal, seguida del tiempo cuya representación es del 15 % en los trabajos; la razón por la cual la demanda es la variable estocástica con mayor frecuencia en la distribución corresponde a que, en representación de una organización, este es uno de los parámetros con mayor variación en el tiempo, que generalmente se representan con una distribución de probabilidad. En los modelos tríadicos la demanda estocástica es tenida en cuenta en el 75 % de los trabajos consultados y el tiempo en un 15 %.

## 5. Función objetivo

En este aparte se presenta la distribución de la función objetivo de los modelos logísticos, donde encontramos que la mayoría concentra sus medidas de desempeño en factores como minimización de costo, tiempo, distancia, impacto ambiental, mejorando el nivel de servicio y beneficio social. La Figura 14 muestra la frecuencia de la función objetivo en cada problema.

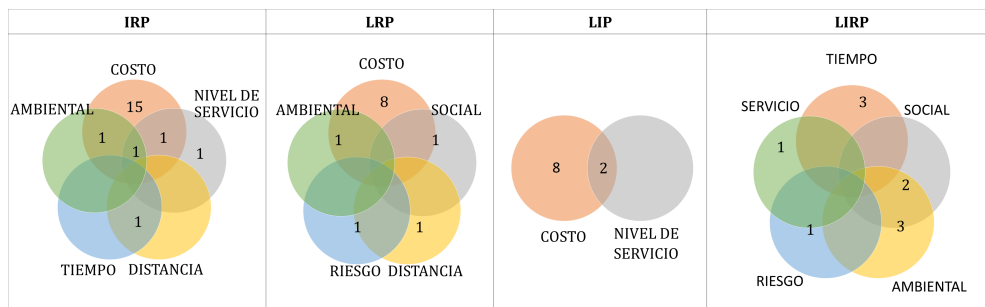


Figura 14. Frecuencia de uso de la función objetivo en los modelos diádicos y tríadicos

En los modelos diádicos el costo es el objetivo más utilizado con un 86 %, dado que las empresas buscan obtener mayor utilidad con la minimización. En los artículos de inventarios, el nivel de existencias es calculado como objetivo en el 68,2 %, la distancia también es representativa en los modelos de localización (25 %) y ruteo (52,4 %).

Dado que el total de los artículos de LIRP tiene en cuenta la minimización del costo en la función objetivo, no se muestra en la Figura 14. La mitad de los modelos tiene función multiobjetivo (50 %), en la cual el 15 % se basa en la minimización del tiempo, el 5 % en maximizar el nivel de servicio y el 5 % en disminución del riesgo. En los modelos tríadicos se destaca que algunos autores (25 %) tienen en cuenta el criterio ambiental, al ser un problema abordado desde el 2010. Se evidencia que es un enfoque relevante en los últimos años, siendo la disminución de las emisiones de dióxido de carbono la más frecuente, como en [72], [73], [75]. El 10 % contempla el beneficio social entre los objetivos, Zhalechian *et al.* [66] contemplan la afectación al ambiente de los procesos y el factor de beneficio social en la creación de nuevos empleos, Eskandari *et al.* [73] plantean un modelo basado en la CS de plaquetas y sangre, para maximizar los efectos sociales y reducir el impacto ambiental. En la literatura se evidencia un reciente interés por atender otros objetivos diferentes al costo, pues en la evolución de las organizaciones aumenta el interés por desarrollar modelos sostenibles, que mitiguen los impactos negativos a nivel social y ambiental.

## 6. Métodos de solución

Los métodos de solución se pueden clasificar en cuatro categorías para los modelos NP-Hard: métodos exactos, heurísticas, metaheurísticas y simulación. En la Figura 15 se presenta la clasificación de los trabajos revisados que emplearon métodos exactos o simulación para encontrar la solución del problema. La investigación en el campo de los modelos logísticos con componentes estocásticos es relevante en el mundo académico, una razón es la complejidad en la búsqueda de los métodos de solución; este tipo de problemas difícilmente son optimizables, y el objetivo se direcciona a buscar soluciones factibles y aproximadas a un valor óptimo [79]. Cabe recalcar que los métodos de optimización exacta son utilizados como base para validar el modelo en instancias pequeñas y comparar el desempeño y la calidad de solución de los algoritmos empleados por los autores.

En la Figura 16 se encuentra una clasificación más detallada de los métodos de solución metaheurística que fueron utilizados para solucionar los modelos. Las metaheurísticas están inspiradas en comportamientos naturales, tales como la evolución, la física o la biología. Los trabajos clasificados en algoritmos genéticos y el recocido simulado son los más utilizados para resolver modelos diádicos y tríadicos; mientras los algoritmos de búsqueda de armonía y el basado en evolución diferencial son menos utilizados.

En la Figura 17 se muestra el porcentaje en el uso de métodos de solución para cada conjunto de modelos. Para modelos IRP se observa que los métodos exactos son bastante utilizados para la validación y comparación en el desempeño (36 %), mientras las metaheurísticas presentan un 28 % y la simulación un 23 %. Los modelos LRP, a diferencia del resto de modelos, presentan una fuerte inclinación hacia la consideración de parámetros difusos mediante programación difusa [20], [25],

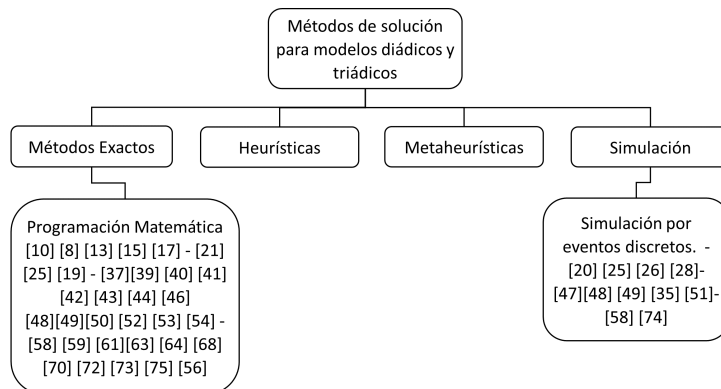


Figura 15. Taxonomía para los métodos de solución de los modelos diádicos y triádicos

[26], [29]. Para la solución de estos modelos se usan con mayor frecuencia métodos heurísticos, seguidamente metaheurísticas (31 %), métodos exactos (21 %) y simulación (14 %). Por su parte, el LIP es el modelo con menor atención por parte de los investigadores, los métodos exactos representan el 60 %, las metaheurísticas el 30 % y las heurísticas el 10 %; en la revisión no se encontró la simulación como método.

El método de solución más utilizado para la resolución de los modelos LIRP son las metaheurísticas, le siguen los métodos exactos, las heurísticas y la simulación. El LIRP, dada su naturaleza NP-Hard y su mayor complejidad, requiere métodos de solución más sofisticados; aunque en instancias pequeñas, los métodos exactos resuelven el problema en un tiempo razonable para el tomador de decisiones.

En la Figura 17 se muestran los métodos de solución empleados en el modelo LIRP estocástico.

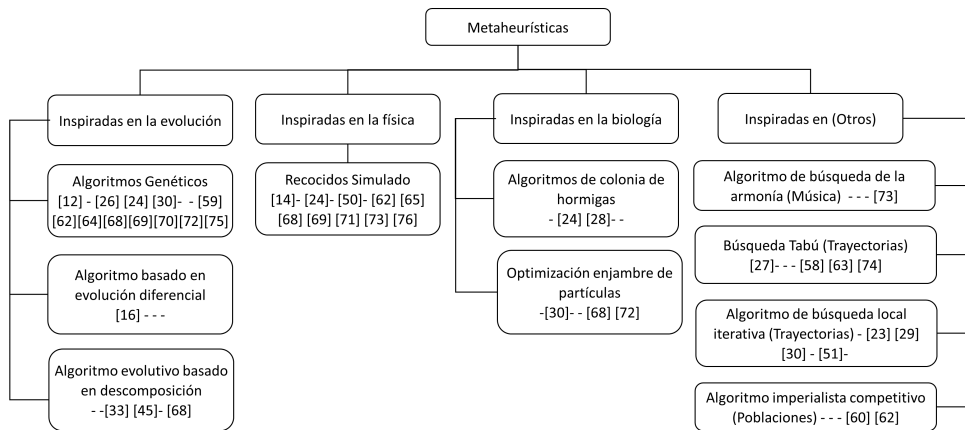


Figura 16. Taxonomía para las metaheurísticas empleadas en los modelos diádicos y triádicos

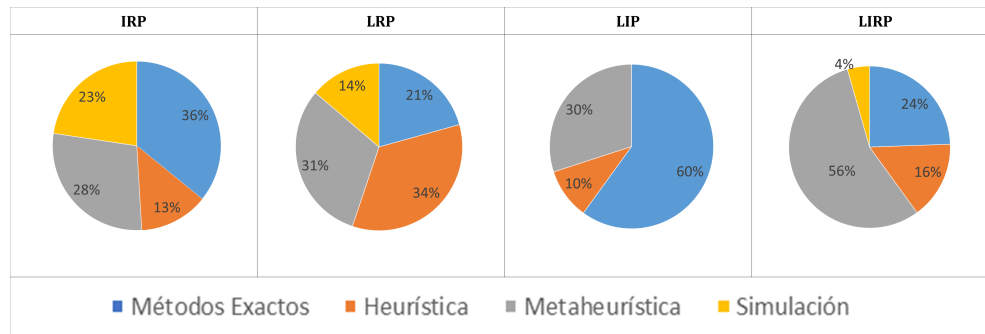


Figura 17. Porcentaje de uso de los métodos de solución en los modelos diádicos

Los métodos de solución aplicados mediante algoritmos para estos modelos, se caracterizan por tener una estructura jerárquica que resuelve en tres etapas, la primera etapa da solución estrictamente al problema de localización, la segunda y la tercera dan solución al problema de inventario o ruteo, el orden depende del autor [76].

## 7. Conclusiones y trabajos futuros

En un marco histórico la revisión de la literatura muestra cómo la complejidad aumenta exponencialmente cuando sus componentes son tratados con variables aleatorias, por lo que los métodos matemáticos y las técnicas de optimización tradicionales demandan tiempo y recursos computacionales en exceso, generando soluciones ineficientes. Por lo tanto, los autores buscan métodos de solución acordes con esta complejidad, las heurísticas y metaheurísticas que resuelven problemas con amplias cantidades de variables y restricciones logran una rápida convergencia en soluciones factibles y en algunos casos soluciones óptimas.

En el campo investigativo ha sido de interés el desarrollo de modelos multiobjetivo, en los que se supera el objetivo de rentabilidad empresarial, aparecen otros objetivos tales como la maximización del beneficio social, el factor social, la generación de nuevos empleos, la cobertura de servicios de salud, y la reducción del impacto ambiental, de los tiempos de atención a una emergencia o un desastre natural en que se vean implicadas vidas humanas.

Los trabajos futuros en LIP deben considerar que en la práctica las CS cuentan con más de un CD, si bien en temas de localización pueden ubicarse o dar apertura a varios de estos, al momento de realizar la asignación cada minorista es atendido por un solo CD; para estudios futuros, se sugiere trabajar el supuesto de que un minorista puede ser atendido por varios de los CD que se abrieron, es un tema que requiere ser más tratado [13]. Futuras líneas de investigación pueden ser la integración de políticas de inventario bajo el contexto de demandas no estacionarias [15], la incorporación del riesgo de ruptura de la CS [14] y los métodos de validación de los resultados obtenidos en las investigaciones [17].

La mayoría de los modelos LRP encuentran limitaciones en ventanas de tiempo, se encuentran pocos modelos con esta característica, por lo que algunos autores establecen que los tiempos de recorrido y la carga de combustible son constantes, es decir independientes de la carga que transportan los automotores, es necesario añadir estas características para una aproximación del modelo a la realidad [19], [29], [30].

Las líneas futuras de investigación en IRP requieren el planteamiento de problemas con estaciones de carga, mantenimiento y operación, capacidades de carga, velocidad y tiempo para lograr mejor empalme del modelo con situaciones cotidianas que logren aportar mayores beneficios a empresas logísticas (PL). [50], [54]. Respecto al LIRP, dado la juventud de estos modelos, se identifica una fuente importante de trabajo investigativo, donde se destaca la necesidad de estudiar modelos LIRP multiproducto y multiperiodo [64], modelos de tres niveles (proveedor, CD, cliente) con políticas de ruteo mixtas, en las que un vehículo pueda ir desde el proveedor al cliente, *back order* y entregas parciales.

## Referencias

- [1] J. A. Orjuela, "Incidencia del diseño de la cadena de suministro alimentaria en el equilibrio de flujos logísticos" (Trabajo de grado - Doctorado), Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, 2018. ↑335
- [2] D. L. Rincón, J. E. Fonseca y J. A. Orjuela-Castro, "Hacia un marco conceptual común sobre trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos", *Ingeniería*, vol. 22, no. 2, pp. 161-189, 2017. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.a01>. ↑336
- [3] M. Koot, M. Mes, and M. E. Iacob, "A systematic literature review of supply chain decision making supported by the Internet of Things and Big Data Analytics", *Comput. Ind. Eng.*, vol. 154, 2021, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107076> ↑336
- [4] M. E. Palmer-Gato, M. Cardós, E. Babiloni y E. Guijarro, "Revisión de modelos de gestión de inventarios para repuestos reparables", *4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XIV Congreso de Ingeniería de Organización*, 2010, pp. 1329-1335. ↑338
- [5] L. A. Sanabria, A. M. Peralta y J. A. Orjuela, "Modelos de localización para cadenas agroalimentarias perecedoras: una revisión al estado del arte", *Ingeniería*, vol. 22, no. 1, pp. 65-82, 2017. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a04> ↑338
- [6] T. Ahmadi, H. Karimi, H. Davoudpour, and S. A. Hosseiniyou, "A robust decision-making approach for p-hub median location problems based on two-stage stochastic programming and mean-variance theory: A real case study", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, pp. 1943-1953, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6569-x> ↑338
- [7] J. A. Orjuela-Castro, J. P. Orejuela-Cabrera, and W. Adarme-Jaimes, "Last mile logistics in mega-cities for perishable fruits", *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 12, no. 2, pp. 318-327, 2019. <https://doi.org/10.3926/jiem.2770> ↑338
- [8] F. You, and I. E. Grossmann, "Mixed-integer nonlinear programming models and algorithms for large-scale supply chain design with stochastic inventory management", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, no. 20, pp. 7802-7817, 2008. <https://doi.org/10.1021/ie800257x> ↑339, 340, 341, 343, 344
- [9] P. A. Miranda, and R. A. Garrido, "A simultaneous inventory control and facility location model with stochastic capacity constraints", *Netw. Spat. Econ.*, vol. 6, pp. 39-53, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-7684-5> ↑339, 340, 341, 343
- [10] C. Das, "Supply and redistribution rules for two-location inventory systems: One-period analysis", *Manage. Sci.*, vol. 21, no. 7, pp. 765-776, 1975. <https://doi.org/10.1287/mnsc.21.7.765> ↑340, 341, 343
- [11] U. S. Karmarkar, "Convex/Stochastic Programming and Multilocation Inventory Problems.", *Nav. Res. Logist. Q.*, vol. 26, no. 1, pp. 1-19, 1979, doi: 10.1002/nav.3800260102. ↑340, 341, 343
- [12] H. Qu, L. Wang, and R. Liu, "A contrastive study of the stochastic location-inventory problem with joint replenishment and independent replenishment", *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 2061-2072, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.03.041>



- [//doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.017](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.017) ↑340, 341, 343
- [13] S. J. Sadjadi, A. Makui, E. Dehghani, and M. Pourmohammad, "Applying queuing approach for a stochastic location-inventory problem with two different mean inventory considerations", *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 1, pp. 578-596, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.06.010> ↑340, 343, 360
- [14] A. Diabat, E. Dehghani, and A. Jabbarzadeh, "Incorporating location and inventory decisions into a supply chain design problem with uncertain demands and lead times", *J. Manuf. Syst.*, vol. 43, pp. 139-149, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.02.010> ↑340, 343, 360
- [15] M. Amiri-Aref, W. Klibi, and M. Z. Babai, "The multi-sourcing location inventory problem with stochastic demand", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 266, no. 1, pp. 72-87, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.003> ↑340, 341, 343, 360
- [16] Y. Li, H. Guo, and Y. Zhang, "An integrated location-inventory problem in a closed-loop supply chain with third-party logistics", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 10, pp. 3462-3481, 2018. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1338781> ↑340, 342, 343
- [17] A. Kuhnle, and G. Lanza, "Investigation of closed-loop supply chains with product refurbishment as integrated location-inventory problem", *Prod. Eng.*, vol. 13, pp. 293-303, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00885-4> ↑340, 342, 343, 360
- [18] M. M. Fazel-Zarandi, O. Berman, and J. C. Beck, "Solving a stochastic facility location/fleet management problem with logic-based Benders' decomposition", *IIE Trans.*, vol. 45, no. 8, pp. 896-911, 2013. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2012.705452> ↑342, 347
- [19] A. M. Caunhye, Y. Zhang, M. Li, and X. Nie, "A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies", *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 90, pp. 161-176, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.10.011> ↑342, 344, 345, 346, 347, 361
- [20] N. Ghaffari-Nasab, S. G. Ahari, and M. Ghazanfari, "A hybrid simulated annealing based heuristic for solving the location-routing problem with fuzzy demands", *Sci. Iran.*, vol. 20, no. 3, pp. 919-930, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2013.02.006> ↑342, 344, 345, 346, 347, 358
- [21] G. Laporte, F. Louveaux, and H. Mercure, "Models and exact solutions for a class of stochastic location-routing problems", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 71-78, 1989. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90354-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90354-8) ↑342, 344, 345, 346, 347
- [22] R. Borges, C. Ferreira, B. Sousa, and S. Barreto, "A taxonomical analysis, current methods and objectives on location-routing problems", *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 20, no. 6, pp. 795-822, 2013. <https://doi.org/10.1111/itor.12032> ↑343, 345, 346
- [23] W. Xie, Y. Ouyang, and S. C. Wong, "Reliable location-routing design under probabilistic facility disruptions", *Transp. Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 1128-1138, 2016. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0630> ↑343, 344, 345, 346, 347
- [24] S. Gao, Y. Wang, J. Cheng, Y. Inazumi, and Z. Tang, "Ant colony optimization with clustering for solving the dynamic location routing problem", *Appl. Math. Comput.*, vol. 285, pp. 149-173, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.03.035> ↑343, 344, 345, 347
- [25] A. Nadizadeh, H. Hosseini, A. Sadeghieh, and M. B. Fakhrazad, "A location-routing problem model with multiple periods and fuzzy demands", *Data Envel. Anal. Decis. Sci.*, vol. 2014, pp. 1-24, 2014. ↑344, 346, 347, 358
- [26] M. Wei, L. Yu, and X. Li, "Credibilistic location-routing model for hazardous materials transportation", *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 23-39, 2015. <https://doi.org/10.1002/int.21679> ↑344, 345, 347, 358
- [27] S.-H. Huang, "Solving the multi-compartment capacitated location routing problem with pickup-delivery routes and stochastic demands", *Comput. Ind. Eng.*, vol. 87, pp. 104-113, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.05.008> ↑344, 345, 346, 347
- [28] N. Herazo-Padilla, J. R. Montoya-Torres, S. Nieto Isaza, and J. Alvarado-Valencia, "Simulation-optimization approach for the stochastic location-routing problem", *J. Simul.*, vol. 9, no. 4, pp. 296-311, 2015. <https://doi.org/10.1057/jos.2015.15> ↑344, 347
- [29] E. Pekel, and S. Soner Kara, "Solving fuzzy capacitated location routing problem using hybrid variable neighborhood search and evolutionary local search", *Appl. Soft Comput.*, vol. 83, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105665> ↑344, 346, 347, 358, 361
- [30] S. Zhang, M. Chen, and W. Zhang, "A novel location-routing problem in electric vehicle transportation with stochastic demands", *J. Clean. Prod.*, vol. 221, pp. 567-581, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.167> ↑344, 346, 347, 361
- [31] J. A. Orjuela-Castro, D. Batero-Manso, and J. P. Orejuela-Cabrera, "Logistics IRP model for the

- supply chain of perishable food”, *Work. Eng. Appl.*, pp. 40-52, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00353-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00353-1_4) ↑347
- [32] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte, “Thirty years of inventory routing”, *Transp. Sci.*, vol. 48, no. 1, pp. 1-19, 2014. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0472> ↑347, 350
- [33] A. Federgruen, and P. Zipkin, “A combined vehicle routing and inventory allocation problem”, *Oper. Res.*, vol. 32, no. 5, pp. 1019-1037, 1984. <https://doi.org/10.1287/opre.32.5.1019> ↑347, 348, 351
- [34] D. F. Batero-Manso, and J. A. Orjuela-Castro, “El problema de ruteo e inventarios en cadenas de suministro de perecederos: revisión de literatura”, *Ingeniería*, vol. 23, no. 2, pp. 117-143, 2018. <https://doi.org/10.14483/23448393.12691> ↑347
- [35] A. Gruler, J. Panadero, J. de Armas, J. A. Moreno, and A. A. Juan, “Combining variable neighborhood search with simulation for the inventory routing problem with stochastic demands and stock-outs”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 123, pp. 278-288, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.036> ↑347, 348, 350, 351
- [36] R. F. Roldán, R. Basagoiti, and L. C. Coelho, “A survey on the inventory-routing problem with stochastic lead times and demands”, *J. Appl. Log.*, vol. 24, pp. 15-24, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jal.2016.11.010> ↑348, 349
- [37] M. K. Rahim, Y. Zhong, E.-H. Aghezzaf, and T. Aouam, “Modelling and solving the multiperiod inventory-routing problem with stochastic stationary demand rates”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no.14, pp. 4351-4363, 2014. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.883470> ↑348, 351
- [38] A. A. Juan, S. E. Grasman, J. Caceres-Cruz, and T. Bektaş, “A simheuristic algorithm for the single-period stochastic inventory-routing problem with stock-outs”, *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 46, pp. 40-52, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.11.008> ↑348, 351
- [39] J. Brinkmann, M. W. Ulmer, and D. C. Mattfeld, “Short-term strategies for stochastic inventory routing in bike sharing systems”, *Transp. Res. Procedia*, vol. 10, pp. 364-373, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.086> ↑348, 350, 351
- [40] Y. Adulyasak, J. F. Cordeau, and R. Jans, “Benders decomposition for production routing under demand uncertainty”, *Oper. Res.*, vol. 63, no. 4, pp. 851-867, 2015. <https://doi.org/10.1287/opre.2015.1401> ↑348, 351
- [41] F. Niakan, and M. Rahimi, “A multi-objective healthcare inventory routing problem; a fuzzy possibilistic approach”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 80, pp. 74-94, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.04.010> ↑348, 350, 351
- [42] L. Bertazzi, A. Bosco, and D. Laganà, “Managing stochastic demand in an Inventory Routing Problem with transportation procurement”, *Omega*, vol. 56, pp. 112-121, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.09.010> ↑348, 351
- [43] D. Bertsimas, S. Gupta, and J. Tay, “Scalable robust and adaptive inventory routing”, *Optim. Online*, pp. 1-29, 2016. ↑348, 351
- [44] H. W. Bouma, and R. H. Teunter, “The routed inventory pooling problem with multiple lateral transshipments”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 54, no. 12, pp. 3523-3533, 2015. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1082668> ↑348, 351
- [45] Y. Crama, M. Rezaei, M. Savelsbergh, and T. Van Woiensel, “Stochastic inventory routing for perishable products”, *Transp. Sci.*, vol. 52, no. 3, pp. 526-546, 2018. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0799> ↑348, 349, 350, 351
- [46] S. Mirzapour Al-e-hashem, Y. Rekik, and E. M. Hoseinhlou, “A hybrid L-shaped method to solve a bi-objective stochastic transshipment-enabled inventory routing problem”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 209, pp. 381-398, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.06.020> ↑348, 351
- [47] E. Yadollahi, E.-H. Aghezzaf, and B. Raa, “Managing inventory and service levels in a safety stock-based inventory routing system with stochastic retailer demands”, *Appl. Stoch. Model. Bus. Ind.*, vol. 33, no. 4, pp. 369-381, 2017. <https://doi.org/10.1002/asmb.2241> ↑348, 350, 351
- [48] E. Yadollahi, E. H. Aghezzaf, J. Walraevens, and B. Raa, “Considering the difference of pre-set service level and actual service level in a safety-stock based SPIRP”, *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 1933-1939, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.337> ↑348, 351
- [49] A. Rahbari, M. M. Nasiri, and E. Ghorbani, “An inventory routing problem for perishable products with demand and transportation time uncertainty: A robust optimization approach”, *The 10th International Conference of Iranian Operations Research Society*, 2017 [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Mohammad\\_Mahdi\\_Nasiri/publication/319644889\\_An\\_inventory\\_routing\\_problem\\_](https://www.researchgate.net/profile/Mohammad_Mahdi_Nasiri/publication/319644889_An_inventory_routing_problem_)

- [for perishable products with demand and transportation time uncertainty: A robust optimization approach/links/59b7b2eaa6fdcc7415bfb0fd/An-inventor](#) ↑ 348, 350, 351
- [50] P. Y. Alves, A. da Silva, V. Freire, and K. Valdivia, “Sistema para resolver o problema de roteamento e inventário com demanda estocástica e janelas de tempo”, *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, 2018, pp. 223-230. ↑ 348, 350, 351, 361
- [51] B. S. Onggo, J. Panadero, C. G. Corlu, and A. A. Juan, “Agri-food supply chains with stochastic demands: A multi-period inventory routing problem with perishable products”, *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 97, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101970> ↑ 348, 349, 351
- [52] R. Rossi, M. Tomasella, B. Martin-Barragan, T. Embley, C. Walsh, and M. Langston, “The Dynamic bowser routing problem”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 275, no. 1, pp. 108-126, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.026> ↑ 348, 350, 351
- [53] E. Yadollahi, E.-H. Aghezzaf, J. Walraevens, B. Raa, and D. Claeys, “Evaluating approximate solution models for the stochastic periodic inventory routing problem”, *J. Manuf. Syst.*, vol. 50, pp. 25-35, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.11.001> ↑ 348, 350, 351
- [54] E. Nikzad, M. Bashiri, and F. Oliveira, “Two-stage stochastic programming approach for the medical drug inventory routing problem under uncertainty”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 128, pp. 358-370, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.055> ↑ 348, 350, 351, 361
- [55] A. Mosca, N. Vidyarthi, and A. Satir, “Integrated transportation - inventory models: A review”, *Oper. Res. Perspect.*, vol. 6, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100101> ↑ 349
- [56] X. Zheng, M. Yin, and Y. Zhang, “Integrated optimization of location, inventory and routing in supply chain network design”, *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 121, pp. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.003> ↑ 349, 353, 355, 356
- [57] V. Gaur, and M. L. Fisher, “A periodic inventory routing problem at a supermarket chain”, *Oper. Res.*, vol. 52, no. 6, pp. 813-822, 2004. <https://doi.org/10.1287/opre.1040.0150> ↑ 349
- [58] A. Ahmadi Javid, and N. Azad, “Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 46, no. 5, pp. 582-597, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.005> ↑ 353, 355, 356
- [59] F. Forouzanfar, and R. Tavakkoli-moghaddam, “Using a genetic algorithm to optimize the total cost for a location-routing-inventory problem in a supply chain with risk pooling”, *J. Appl. Oper. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 2-13, 2012. ↑ 353, 354, 356
- [60] N. Nekooghadrilri, R. Tavakkoli-Moghaddam, and V. R. Ghezavati, “Efficiency of a multi-objective imperialist competitive algorithm: A bi-objective location-routing-inventory problem with probabilistic routes”, *J. AI Data Min.*, vol. 2, no. 2, pp. 105-112, 2014. ↑ 353, 356
- [61] R. Tavakkoli-Moghaddam, F. Forouzanfar, and S. Ebrahimnejad, “Incorporating location, routing, and inventory decisions in a bi-objective supply chain design problem with risk-pooling”, *J. Ind. Eng. Int.*, vol. 9, 2013. <https://doi.org/10.1186/2251-712X-9-19> ↑ 353, 354, 356
- [62] N. Nekooghadrilri, R. Tavakkoli-Moghaddam, V. R. Ghezavati, and S. Javanmard, “Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 76, pp. 204-221, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.08.004> ↑ 353, 356
- [63] D. Chen, D. Chen, G. Sun, and G. Liu, “Combined location routing and inventory problem of e-commerce distribution system with fuzzy random demand”, *Int. J. Hybrid Inf. Technol.*, vol. 7, no. 5, pp. 429-442, 2014. ↑ 353, 356
- [64] S. M. Seyedhosseini, A. Bozorgi-Amiri, and S. Daraei, “An integrated location-routing- inventory problem by considering supply disruption”, *iBusiness*, vol. 6, no. 2, pp. 29-37, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/ib.2014.62004> ↑ 353, 355, 356, 361
- [65] B. Liu, H. Chen, Y. Li, and X. Liu, “A pseudo-parallel genetic algorithm integrating simulated annealing for stochastic location-inventory-routing problem with consideration of returns in e-commerce”, *Discret. Dyn. Nat. Soc.*, vol. 2015, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/586581> ↑ 353, 355, 356
- [66] M. Zhalechian, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Zahiri, and M. Mohammadi, “Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 89, pp. 182-214, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011> ↑ 353, 356, 358
- [67] Z. Rafie-Majd, S. H. Pasandideh, and B. Naderi, “Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation al-

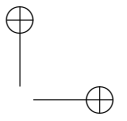
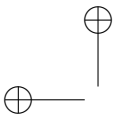
- gorithm”, *Comput. Chem. Eng.*, vol. 109, pp. 9-22, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.013> ↑353, 355, 356
- [68] F. Rayat, M. M. Musavi, and A. Bozorgi-Amiri, “Bi-objective reliable location-inventory-routing problem with partial backordering under disruption risks: A modified AMOSA approach”, *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 59, pp. 622-643, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.036> ↑353, 354, 356
- [69] M. R. Gholamian, and M. Heydari, “An inventory model with METRIC approach in location-routing-inventory problem”, *Adv. Prod. Eng. Manag.*, vol. 12, no. 2, pp. 115-126, 2017. <https://doi.org/10.14743/apem2017.2.244> ↑353, 356
- [70] S. Nakhjirkan, and F. Mokhatab Rafiei, “An integrated multi-echelon supply chain network design considering stochastic demand: A genetic algorithm based solution”, *Promet - Traffic & Transportation*, vol. 29, no. 4, pp. 391-400, 2017. <https://doi.org/10.7307/ptt.v29i4.2193> ↑353, 354, 356
- [71] E. Dehghani, N. Behfar, and M. S. Jabalameli, “Optimizing location, routing and inventory decisions in an integrated supply chain network under uncertainty”, *J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 93-111, 2016. ↑353, 354, 356
- [72] E. Asadi, F. Habibi, S. Nickel, and H. Sahebi, “A bi-objective stochastic location-inventory-routing model for microalgae-based biofuel supply chain”, *Appl. Energy*, vol. 228, pp. 2235-2261, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.067> ↑353, 354, 356, 358
- [73] M. Eskandari-Khanghahi, R. Tavakkoli-Moghaddam, A. A. Taleizadeh, and S. H. Amin, “Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty”, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 71, pp. 236-250, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.03.004> ↑353, 354, 356, 358
- [74] Q. Yuchi, N. Wang, Z. He, and H. Chen, “Hybrid heuristic for the location-inventory-routing problem in closed-loop supply chain”, *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 28, no. 3, pp. 1265-1295, 2018. <https://doi.org/10.1111/itor.12621> ↑353, 356
- [75] S. Nakhjirkan, F. M. Rafiei, and A. H. Kashan, “Developing an integrated decision making model in supply chain under demand uncertainty using genetic algorithm and network data envelopment analysis”, *Int. J. Math. Oper. Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 53-81, 2019. ↑353, 356, 358
- [76] N. I. Saragih, S. N. Bahagia, Suprayogi, and I. Syabri, “A heuristic method for location- inventory-routing problem in a three-echelon supply chain system”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 127, pp. 875-886, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.026> ↑353, 354, 355, 356, 360
- [77] U. S. Rao, “Properties of the periodic review (R,T) inventory control policy for stationary, stochastic demand”, *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, vol. 5, no. 1, pp. 37-53, 2003. <https://doi.org/10.1287/msom.5.1.37.12761> ↑354
- [78] C. R. González y J. S. Nieves, “Solución del problema de optimización de inventario de dos escalones con demanda estocástica para una red de distribución de un solo producto” (Trabajo de grado), Universidad Industrial de Santander, 2018. ↑354
- [79] E. C. González, O. González y M. Becerra, “Estado del arte del problema de ruteo de vehículos con componentes estocásticos”, *Inventum*, vol. 13, no. 24, pp. 2-13, 2018. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.13.24.2018.2-14> ↑358

### Javier Martínez Bernal

Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; analista de gestión comercial en Tuya S.A.; integrante del Grupo de investigación GICALyT.  
Correo electrónico: jmartinezb@correo.udistrital.edu.co

### Ricardo Andrés Cuervo Cruz

Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; analista de flota en Gran Américas Usme S.A.S; integrante del Grupo de investigación GICALyT.  
Correo electrónico: racuervo@correo.udistrital.edu.co

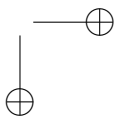
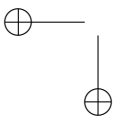


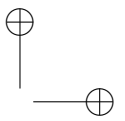
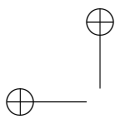
---

**Javier Arturo Orjuela Castro**

Ingeniero de Alimentos; Ingeniero Industrial; Especialista en Ingeniería de Producción, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Magister en Investigación de Operaciones y Estadística, Universidad Tecnológica de Pereira; Doctor en Ingeniería Industrial y Organizaciones, Universidad Nacional de Colombia; Docente e investigador en el área de logística y cadenas de suministro, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, líder del grupo de investigación GICALyT.

Correo electrónico: [orjuela@udistrital.edu.co](mailto:orjuela@udistrital.edu.co)





## Research

## Escenario técnico y económico para la valorización integral a pequeña escala de residuos de naranja en Colombia

*Technical and Economic Scenario for the Integral Small-Scale Valorization of Orange Waste in Colombia*

Santiago Bedoya Betancur <sup>1</sup>, Sebastián Amar Gil <sup>2</sup>, Rolando Barrera Z <sup>1</sup>, Erasmo Arriola V <sup>2</sup>, Alba N. Ardila A. <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo CERES Agroindustria e Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), <sup>2</sup>Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER), Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (Medellín, Colombia).

\*correspondence email: santiago\_bedoya27081@elpoli.edu.co

Recibido: 17/03/2021. Modificado: 06/07/2021. Aceptado: 06/07/2021.

### Abstract

**Context:** The integral valuation of orange peel was studied under a biorefinery scheme where orange oil (with hydrolate as a by-product and the valorization of the oil through the extraction of limonene in later stages), pectin and flour were obtained for use as a supplement in animal feeding.

**Method:** The process consisted of four general stages: i) extracting and obtaining orange oil and hydrolate through steam distillation, ii) obtaining limonene, iii) extracting pectin through the acid hydrolysis method, and iv) obtaining animal food from centrifugation and drying processes.

**Results:** The experiments and characterizations were carried out at the laboratory scale, from 700 g of peel (wet) 3,34 mL of oil (80-85 % limonene), about 500 mL of hydrolate and about 260 g of solid residues (dry) were obtained. From these, around 9,7 g of pectin and around 40,3 g of flour for animal food supplements were obtained from batches of 50 g of dry material.

**Conclusions:** According to the technical-economic analysis for the scale of production used, as well as for the national context, positive indicators such as the net present value (27'271.933) and the internal rate of return (5,27 %) were achieved, which show an interesting investment alternative to be considered as a waste valorization option for small and medium citrus producers in the country.

**Keywords:** Essential oil, orange peel, limonene, pectin, animal feed, waste valorization.

**Acknowledgements:** The authors would like to thank "Convocatoria de Proyectos de Investigación Sede Central y Sedes Regionales del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2018" for funding this project, as well as Universidad de Antioquia for the support through the Vice Rector's Office for Research and its support strategy for research groups in the 2018-2019 process of consolidation.

**Language:** Spanish

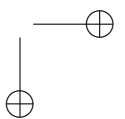
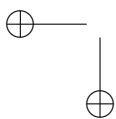
### Open access



Cite this paper as: Bedoya-Betancur, S., Amar-Gil, S., Barrera-Zapata, R., Arriola-V, E., Ardila A, A.N.: Escenario técnico y económico para la valorización integral a pequeña escala de residuos de naranja en Colombia. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 367:380.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.17783>



### Resumen

**Contexto:** Se estudió la valoración integral de cáscara de naranja bajo un esquema de biorrefinería en el que se obtiene aceite de naranja (con hidrolato como subproducto y la valorización del aceite mediante la extracción de limoneno en etapas posteriores), pectina y harina para uso como suplemento en alimentación animal.

**Método:** El proceso consistió en cuatro etapas generales: i) extracción y obtención de aceite e hidrolato de naranja mediante el proceso de arrastre de vapor, ii) obtención de limoneno, iii) extracción de pectina por medio de hidrólisis ácida, y iv) obtención de pienso a partir de procesos de centrifugado y secado.

**Resultados:** Los experimentos y las caracterizaciones se realizaron a escala laboratorio, donde a partir de 700 g de cáscara (húmeda) se obtuvieron 3,34 mL de aceite (80-85 % limoneno), alrededor de 500 mL de hidrolato y cerca de 260 g de residuos sólidos (secos). De estos últimos, a partir de lotes de 50 g de material seco, se obtuvieron 9,7 g de pectina y alrededor de 40,3 g de harina para suplemento en alimentación animal.

**Conclusiones:** Según el análisis técnico-económico para la escala de producción utilizada y para el contexto nacional, se logran indicadores positivos como el valor presente neto (27'271.933) y la tasa interna de retorno (5,27 %), que muestran la alternativa de inversión interesante como para ser considerada una opción de valoración de residuos por pequeños y medianos productores de cítricos en el país.

**Palabras clave:** aceite esencial, cáscara de naranja, limoneno, pectina, pienso, valoración de residuos

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a la "Convocatoria de Proyecto de Investigación Sede Central y Sedes Regionales del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2018" por financiar este proyecto, así como a la Universidad de Antioquia por el apoyo a través de la Vicerrectoría de Investigaciones y su estrategia de apoyo a los grupos de investigación en el proceso de consolidación 2018-2019.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

El crecimiento poblacional, ligado al necesario incremento en la producción de alimentos y la industrialización, ha acelerado el desarrollo de diversos sectores agroindustriales, con el consecuente aumento en la generación de materiales de desecho y residuos de cosecha [1]. Se estima que la producción mundial de desperdicios de alimentos constituye más de 1,3 billones de toneladas por año [2]. Los problemas ambientales más comúnmente asociados a esta industria se ven reflejados en aguas superficiales y subterráneas, cambios en el pH del suelo y generación de gases de efecto invernadero [3].

En cuanto a la industria de frutos cítricos, se estima a nivel global una producción cercana a los 124 millones de toneladas anuales, siendo Brasil, China, India, Estados Unidos y la UE algunos de los mayores productores [1]. Del total de producción de cítricos, entre el 30 y el 40 % se destina a la producción de jugos [4], por lo que las cáscaras, bagazos y semillas, que en el caso de frutos como la naranja pueden llegar a representar hasta el 40 % del peso total del fruto, se descartan como desechos [5]–[7]. No obstante, estos desechos tienen un alto potencial de valoración si se utilizan como materia prima para la obtención de subproductos de valor agregado, ya que contienen sustancias de interés comercial que incluyen, entre otros, diversos metabolitos, compuestos bioactivos, enzimas, fibras, material proteínico, aceites esenciales, azúcares fermentables, entre otros [4], [5], [8].



En la literatura se encuentran diversos estudios sobre la obtención de productos de valor agregado a partir de los residuos de la industria de los cítricos, específicamente cáscaras de naranja, buscando la integración de diferentes procesos y la obtención de variados productos a partir de la misma materia prima bajo el concepto de biorrefinería, para minimizar los impactos negativos en el medio ambiente a la vez que se favorece la economía de los procesos. A manera de ejemplo, Pourbafrani *et al.* [9] estudiaron la producción simultánea, a escala piloto, de bioetanol (con rendimientos cercanos a 40 L), metano (produciendo cerca de 45 m<sup>3</sup>), limoneno (alrededor de 9 L) y pectina (cerca de 39 kg). Lohrasbi *et al.* [10] realizaron el diseño del proceso y su análisis económico para la producción de limoneno, etanol y biogás. Senit *et al.* [11] propusieron la producción de terpenos, extractos fenólicos, pectina y monosacáridos. Por su parte, Patsalou *et al.* [2] estudiaron la producción integrada de aceite esencial, pectina, fertilizantes y ácido succínico. De la misma manera, otros autores han estudiado la extracción de aceite esencial, polifenoles y pectina utilizando técnicas y metodologías amigables con el medio ambiente [12]. En cuanto a la viabilidad económica de estos procesos, se han reportado análisis económicos para biorrefinerías con capacidad de tratamiento integral de hasta 100.000 toneladas de cáscara de naranja al año mediante procesos biotecnológicos, obteniendo como principales productos limoneno, pectina, etanol y metano, este último usado como fuente de energía en diversas etapas del mismo proceso de biorrefinería [11]. No obstante, algunos autores afirman que los altos costos asociados a etapas específicas de producción en una biorrefinería de naranja dificultan la posibilidad de implementar algunos procesos específicos [13].

En resumen y de acuerdo con la revisión de la literatura, es claro que los residuos de naranja contienen gran cantidad de sustancias de valor agregado. Por lo tanto, el procesamiento de tales residuos que contaminan el ambiente puede transformarlos en productos con valor económico que mejoren la economía de los procesos. En la Figura 1 se muestran algunos de los productos más comúnmente estudiados como posibles subproductos de valor agregado a partir del aprovechamiento de los residuos de naranja bajo el concepto de biorrefinería. No obstante, es importante considerar que no cualquier proceso puede ser fácilmente adaptado o no cualquier producto puede ser fácilmente comercializado si no se consideran las condiciones específicas (incluyendo condiciones sociales, geográficas, culturales y demográficas) de la zona donde los residuos se encuentran disponibles [14].

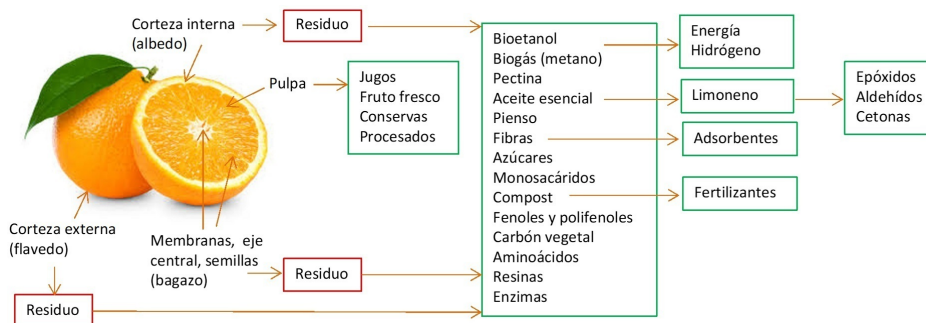
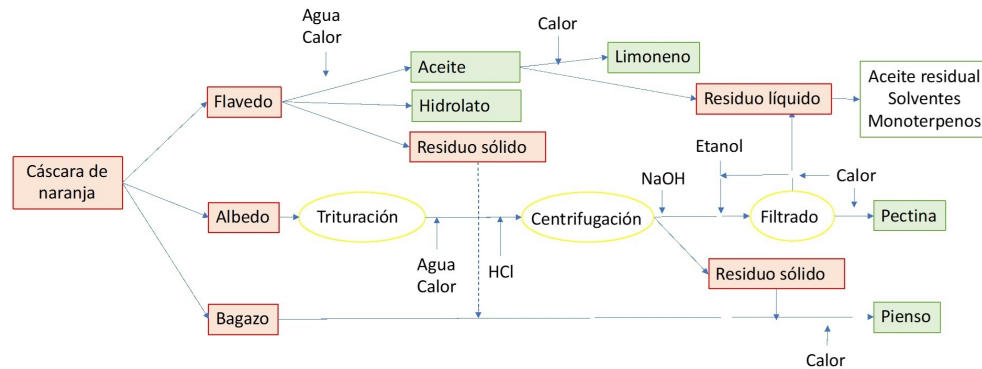


Figura 1. Algunos posibles productos a partir de la naranja y sus residuos

Fuente: elaboración propia.





**Figura 2.** Esquema propuesto para una biorrefinería de cáscara de naranja  
**Fuente:** elaboración propia.

En el caso de Colombia, la actividad agrícola y agroindustrial genera una cantidad de residuos cercana a los 72 millones de toneladas anuales, incluyendo residuos provenientes de café, palma de aceite, caña de azúcar, maíz, banano, plátano y cítricos. Generalmente dichos residuos son incinerados o dispuestos en rellenos sanitarios [4], [15].

Para el caso de las naranjas, en Colombia se producen cerca 230 mil toneladas por año [4], pero los residuos que se generan a partir de esa fruta no suelen ser aprovechados de manera eficiente [15], [16]. Los estudios en los que se aborda el aprovechamiento de estos residuos en Colombia se han enfocado principalmente en la obtención de biocombustibles, compostaje, fibras, suplementos alimenticios para animales, aceites o pectinas [4], [5], [16]–[20], los cuales son altamente deseados en el mercado nacional. No obstante, la mayoría de estos estudios se concentran en el aprovechamiento de los residuos de la naranja para la obtención de algún producto de manera aislada y no bajo el concepto integral de una biorrefinería. Adicionalmente, solo unos pocos incluyen análisis de viabilidad técnica y económica para los procesos propuestos [16], [21]–[23].

En este trabajo se presenta un análisis técnico y económico preliminar para el aprovechamiento integral de residuos de naranja a pequeña escala (procesamiento de 189 kg de cáscara de naranja al mes), obteniendo como productos el aceite de naranja, la pectina y la obtención de harina para suplemento alimenticio de animales (pienso). Se seleccionaron esos productos por presentar un mercado atractivo en el contexto nacional, por permitir el aprovechamiento integral de la totalidad de los residuos de naranja y porque los procesos o técnicas para su implementación son relativamente simples y pueden ser fácilmente adaptables, a pequeña y mediana escala, en regiones del país donde las condiciones socioculturales y económicas pueden dificultar la implementación de tecnologías de mayores costos o nivel de complejidad. La obtención y caracterización de estos productos se realizó a escala laboratorio, siguiendo procedimientos descritos en la literatura y que eventualmente pueden ser optimizados (en cuanto a los rendimientos específicos) bajo diferentes condiciones operativas. Los resultados a escala laboratorio se utilizaron como base de cálculo para realizar un análisis técnico-económico preliminar de su eventual implementación en el contexto na-

cional. Para el aprovechamiento del total de los residuos, inicialmente se extrajo el aceite de naranja (con hidrolato como subproducto y la posibilidad de aislar limoneno a partir del aceite como estrategia de valorización adicional en etapas posteriores). A partir de los residuos de la extracción del aceite, se extrajo la pectina y, finalmente, los residuos de la extracción de pectina se transformaron en harina para suplemento alimenticio animal. El esquema general de la biorrefinería propuesta en esta investigación para el aprovechamiento integral de cáscara de naranja se muestra en la Figura 2.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Obtención y acondicionamiento de la materia prima

Como materia prima se utilizaron naranjas residuales (frutos que por su tamaño no cumplen las normas NTC 4086 para su comercialización, es decir, calibre inferior a 61 mm [24]) provenientes del departamento de Caldas (Colombia) y que fueron cosechadas durante el primer trimestre de 2020. Utilizando prensado, de cada fruto se extrajeron aproximadamente 43 cm<sup>3</sup> de jugo para consumo. Las cáscaras residuales se lavaron con agua, se trozaron manualmente a un tamaño aproximado de 2 cm y se almacenaron en nevera a 4 °C hasta su utilización en los diferentes procesos. Antes de utilizarlas y con la ayuda de cuchillas, se separó el flavedo (corteza), el albedo (parte blanca de la cáscara) y el bagazo (membranas y eje central) (ver Figura 1).

### 2.2. Obtención y caracterización del aceite esencial de naranja

Para la extracción del aceite se usó un equipo extractor de aceites esenciales por arrastre de vapor a escala laboratorio marca Figmay, con cámara de extracción de 5,6 litros y sistema eléctrico para calentamiento y control de temperatura. Todas las pruebas se realizaron a presión atmosférica durante 2 horas de operación, fijando en el equipo la potencia (1.500 W), el nivel de agua (controlado mediante un controlador de nivel) y la cantidad de materia prima utilizada para la extracción según la capacidad del equipo (700 g de cáscara de naranja en cada lote). Los experimentos se realizaron por triplicado usando como materia prima la cáscara completa (flavedo + albedo + bagazo), combinaciones de algunos elementos constitutivos de la cáscara (flavedo + albedo, flavedo + bagazo), solo flavedo, solo albedo y solo bagazo.

El aceite extraído se almacenó en frascos ámbar a 4 °C. Para su caracterización [18], [25], se determinó el índice de acidez (mg de KOH requeridos para neutralizar 1 g de aceite esencial, norma ISO 1242:1999); la densidad relativa (pesando por separado agua destilada y aceite esencial en un picnómetro, norma ISO 279:1998); el índice de refracción (equipo Anton Paar, MCP 100 a longitud de onda de 589,3 nm) y el ángulo de rotación específica (polarímetro Anton Paar, Ab-bemat 200, norma ISO 280:1998). También se determinó la solubilidad en etanol al 95 % (norma ISO 875:1999) y la cantidad de limoneno por cromatografía de gases, usando un equipo Shimadzu GC-2010 con un detector de ionización de llama y una columna capilar DB-1. El método cromatográfico se tomó de la literatura [26].

### 2.3. Extracción y caracterización de pectina

Los experimentos se realizaron por triplicado e iniciaron con el secado de la materia prima a 120 °C durante 48 horas. La materia prima utilizada fueron los residuos sólidos posteriores al proceso de extracción del aceite. Para la extracción de pectina se siguieron recomendaciones de la literatura [18], [19], [21], [27]–[29]. Cada lote se preparó con una solución de 50 g de material seco (triturado en molino de cuchillas y tamizado en malla ASTM 80) en 700 mL de agua desionizada. El pH de la solución se ajustó a 3 usando HCl (37 %). La solución se calentó a 85 °C por 40 minutos y posteriormente se centrifugó a 5.000 rpm por 2 minutos. Del sobrenadante se extrajo la pectina, mientras que el precipitado se usó posteriormente como materia prima para la producción de harina para alimentación animal (pienso). Al sobrenadante se adicionó NaOH al 40 % hasta alcanzar un pH de 12. Posteriormente se agregó etanol al 70 % (80 % del volumen inicial de la solución) para precipitar la pectina, se mantuvo la solución en reposo por 24 horas y después se filtró al vacío, secando el producto final a 40 °C por 24 horas.

La pectina se caracterizó por FTIR en un espectrofotómetro IR Shimadzu IRAffinity-1S, mezclando 1 mg de muestra con 100 mg de KBr. Adicionalmente se determinó su humedad en una estufa de secado a 120 °C. Para cuantificar el contenido de cenizas totales se llevó 1 g de muestra a una mufla a 600 °C por 4 horas. Por su parte, el peso equivalente y la acidez libre se determinaron por la técnica de Owen, titulando la muestra con rojo de fenol.

### 2.4. Obtención y caracterización de harina para suplemento en alimentación animal

Para la producción de pienso se utilizó el residuo del proceso de extracción de pectinas. La materia prima se secó a 60 °C por 24 horas en un horno convencional. Para su caracterización, se realizaron análisis bromatológicos en los que se determinó la cantidad de proteína y la cantidad de fibra siguiendo el método IN-GS-3.048 V8. También se determinó su contenido de humedad en una estufa de secado a 120 °C y su contenido de grasa por el método Soxhlet, con solventes orgánicos durante 2 horas [30].

## 3. Resultados

### 3.1. Extracción y caracterización del aceite esencial de naranja

En la Tabla I se presentan los resultados de extracción de aceite de naranja y la obtención de hidrolato como subproducto, utilizando en todos los casos 700 g de material (húmedo).

El mayor rendimiento hacia aceite esencial de naranja, utilizando como materia prima solo el flavedo (corteza externa de la cáscara), representa aproximadamente el 0,42 % p/p, cercano a datos reportados en la literatura y que oscilan entre el 0,5 % y 0,61 % p/p [13], [31]. La ausencia de aceite en el albedo y el bagazo explica la disminución en los rendimientos cuando se utilizan combinados con el flavedo como materia prima, pues la cantidad total de material utilizado para todas las extracciones fue similar (700 g).

**Tabla I.** Cantidad de aceite de naranja extraído a partir de diferentes partes de la cáscara

Material	Aceite (mL)	Hidrolato (mL)
Flavado	3,34 ± 0,2	aprox. 500
Flavado + albedo	2,83 ± 0,2	aprox. 300
Flavado + albedo + bagazo	1,34 ± 0,2	aprox. 300
Albedo + bagazo	trazas	trazas
Albedo	trazas	trazas
Bagazo	trazas	trazas

Por su parte, los análisis cromatográficos revelaron que el limoneno corresponde al principal componente en el aceite esencial (entre 80 y 85 %), detectándose además pequeñas cantidades de sustancias que corresponden a  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -mircenol y  $\beta$ -linalol, entre otros.

En cuanto a la caracterización fisicoquímica del aceite, la Tabla II resume los valores determinados, observándose que en su mayoría coinciden con hidrocarburos alifáticos no oxigenados. De acuerdo con los valores de referencia que se muestran en la Tabla II (tomados de [20]), es posible considerar el producto obtenido para aplicaciones varias, incluyendo fragancia en productos para el hogar, cremas para masajes y productos de tocador, entre otras.

**Tabla II.** Caracterización fisicoquímica del aceite de naranja

Propiedad	Unidad	Valor	Valor referencia
Densidad (20 °C)	g/mL	0,865	0,842 - 0,855
Índice de refracción (20 °C)	nD	1,476	1,468 - 1,476
Solubilidad en etanol al 95 % (25 °C)	volúmenes	entre 7 y 10	entre 8 y 10
Rotación óptica	°	+93,8	+94 - +99
Viscosidad (20 °C)	mPas	0,918	0,99

### 3.2. Extracción y caracterización de pectina

En cuanto a la obtención de pectina, en los experimentos que se utilizó como materia prima solo flavado o solo bagazo no se obtuvo una cantidad significativa de producto. Los mayores rendimientos se obtuvieron al utilizar como materia prima solo albedo, con un rendimiento (en base seca) del 19,36 % ( $\pm 0,44$ ), es decir, alrededor de 9,68 g de pectina por cada lote de 50 g de materia prima. Este valor concuerda con la literatura, en la que se han reportado rendimientos hacia la pectina entre el 14 y el 23 % utilizando diferentes variedades de naranja o diferentes condiciones de operación [6], [18]. La caracterización de la pectina obtenida se resume en la Tabla III.

**Tabla III.** Caracterización fisicoquímica de la pectina

Humedad (%)	Cenizas (%)	Contenido metoxilo (%)	Peso equivalente	Acidez libre (meq. carbolixos lb/g)
13,21 ± 1,02	2,10 ± 1,09	4,49 ± 0,04	2499,5	0,4

Un alto contenido de humedad en la pectina determina su textura e incide directamente sobre su estabilidad y calidad. Por su parte, la cantidad de cenizas puede afectar la capacidad de gelificación de la pectina. Dentro de los estándares recomendados para este parámetro el valor puede variar entre valores <3,99 % [27] y valores <10 % [32], según el fin último o uso de la pectina. En ese sentido, la pectina obtenida en este estudio puede tener un amplio margen de aplicaciones. El contenido de metoxilos permite clasificar la pectina obtenida como de bajo metoxilo, lo cual se correlaciona con poca solubilidad en agua.

Con relación al peso equivalente, su valor se correlaciona con la propiedad de gelificación. El valor obtenido en este estudio se ubica dentro de los rangos reportados para pectina extraída de otros tipos de naranja y diferentes condiciones de pH, que van desde 974 hasta 2.740. La acidez libre también se encuentra dentro de rangos reportados para pectinas extraídas a partir de cítricos (entre 0,372 y 0,844 meq. carboxilos lb/g) [28]. Los espectros FTIR permitieron identificar bandas características entre 1.000 y 1.200 relacionadas con el grupo C- O, bandas entre 1.500 y 1.700 relacionadas al C=O del ácido galacturónico, bandas entre 1.700 y 1.800 relacionadas con la señal del C=O de los ésteres, bandas entre 2.900 y 3.000 relacionadas con la presencia de grupos CH y bandas entre 3.000 y 3.500 atribuidas a grupos - OH, mostrando similitudes con el espectro FTIR de una pectina comercial [23].

### 3.3. Obtención y caracterización de harina para suplemento en alimentación animal

El rendimiento promedio de la harina fue de 80,64 %  $\pm$  0,96, es decir, se producen alrededor de 40,3 g de harina a partir de cada lote de 50 g utilizado para la extracción de pectina. En la Tabla IV se presentan los resultados de caracterización bromatológica de la harina.

Tabla IV. Caracterización fisicoquímica de la harina

Humedad (%)	Cenizas (%)	Grasa (%)	Proteína (%)	CHO (%)
14,45	10,59	1,94	2,63	70,39

CHO: Carbohidratos totales (determinados por diferencia).

El contenido de fibra se cuantificó alrededor del 27,44 % de los carbohidratos totales, por lo cual la harina obtenida a partir de residuo de naranja constituye una alternativa como uso potencial para elaboración de suplementos alimenticios para animales, ya sea para contribuir a otros nutrientes o como fuente de fibra dietaria; no obstante, procesos posteriores de secado pueden ser requeridos para incrementar el rango de aplicabilidad del producto [30].

### 3.4. Análisis técnico-económico preliminar

Con el objetivo de realizar un análisis técnico-económico del proceso integrado, se establecieron diversos indicadores económicos considerando la producción, a partir de la cáscara de naranja proveniente de residuos agroindustriales, de aceite, hidrolato, limoneno, pectina y harina para alimentación animal. Como base de cálculo se usaron los consumos de reactivos y materia prima, así como los rendimientos obtenidos a escala de laboratorio para los productos mencionados. Para la proyección de producción mensual, se consideró el procesamiento de 9 lotes diarios (incluyendo

entre cada lote el tiempo muerto de los equipos para su carga, descarga y limpieza) durante 30 días al mes. En cada lote se supone el procesamiento de 700 g de cáscaras de naranja. Bajo esos supuestos, la Tabla V resume los consumos y costos de reactivos mensuales para la biorrefinería de cáscara de naranja propuesta (Figura 2). Por tratarse de una escala de producción pequeña y considerando su eventual implementación o acoplamiento en o cerca a industrias procesadoras de cítricos, el costo de la materia prima (cáscara de naranja residual) y su acopio se consideran en cero pesos.

**Tabla V.** Consumo y costos (COP) de reactivos y materia prima a escala de laboratorio

<b>Materia prima/reactivo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Consumo mensual</b>	<b>Costo mensual</b>
Cáscara de naranja	kg	189	-
HCl (37 %)	L	0,810	\$ 70.330
Etanol	L	151,2	\$ 904.828
Rojo de fenol	L	0,810	\$ 1'850.760
NaOH	L	1,350	\$ 980.300
<b>Total</b>			<b>\$ 3'806.218</b>

Para la obtención y caracterización (control de calidad) de los diferentes productos, se requieren inversiones fijas representadas en diversos equipos de laboratorio, de cómputo y muebles, incluyendo equipo de centrifugación, plancha de agitación y calentamiento, equipo extractor de aceites, mufla, Soxhlet, balanza de humedad, estufa y vidriería general. Tomando como base los costos de estos equipos a escala laboratorio, las inversiones fijas se estimaron en \$ 25'939.965 COP.

En la Tabla VI se presentan los costos de operación estimados, incluyendo mano de obra, agua, energía eléctrica, arrendamiento y servicios técnicos proyectados por mes de operación. El costo de mano de obra se estimó con base en el salario mínimo en Colombia para el año 2021, suponiendo personal no calificado. Para los costos de agua y energía se tomó como base el valor promedio de m<sup>3</sup> y kWh (respectivamente) en la ciudad de Medellín. En cuanto a los costos de arrendamiento, se tomó como referencia el promedio de un local comercial entre 80 y 100 m<sup>2</sup> en la ciudad de Medellín. Por su parte, los costos de servicios técnicos incluyen 4 análisis mensuales del contenido de fibra y proteína en la harina, 2 análisis mensuales de espectroscopia FTIR para la pectina y 2 análisis mensuales de cromatografía de gases para el aceite, todos ellos con el fin de llevar registro de control y calidad de los productos. El costo de los análisis se fijó según los valores promedio en laboratorios certificados.

La Tabla VII muestra el volumen de producción estimado y el valor (COP) comercial para los productos obtenidos en el presente trabajo. En general, se encontró una amplia variabilidad en los precios según la fuente consultada (casas comerciales como Sigma-Aldrich y Merck, diversos sitios Web, distribuidores minoritarios y productores directos, entre otros) y sus especificaciones técnicas. A manera de ejemplo, para el aceite de naranja y el hidrolato se encuentran precios, por mililitro, en los intervalos de \$500 - \$7.200 y \$50 - \$380, respectivamente. Dada la naturaleza preliminar de este estudio, en la Tabla VII se asume un valor conservador de los mismos, utilizando el promedio de los valores, excluyendo datos máximos y mínimos en cada caso. Del total de ventas, dados los volúmenes de producción y valores de venta seleccionados, se observa que cerca del 85 % de los ingresos se espera a partir del hidrolato, dado su alto volumen de producción. Bajo tal

**Tabla VI.** Costos operativos estimados para un mes de producción

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario	Total
Personal	3	Salario	\$ 1'014.980	\$ 3'044.940
Agua	4,8	m <sup>3</sup>	\$ 3.588	\$ 17.222
Energía	2.700	kWh	\$ 498	\$ 1'344.600
Arrendamiento	1	N/A	\$ 3'000.000	\$ 3'000.000
Servicios técnicos	8	Análisis	\$ 150.530	\$ 1'204.240
<b>Total</b>				<b>\$ 8'611.002</b>

escenario, un análisis económico riguroso podría considerar excluir del proceso global productos como la harina, cuya contribución a los ingresos totales es inferior al 1%; sin embargo, desde una perspectiva ambiental, su inclusión en el proceso global es interesante, ya que permite transformar la totalidad de los residuos en productos de valor, mientras que con la sola obtención de aceite (limoneno), hidrolato y pectina se mantendría un alto porcentaje de desecho sólido de la cáscara para su disposición final. Adicionalmente, un esquema de producción a mayor escala podría generar suficiente cantidad de harina como para considerar una efectiva inclusión de este producto en los mercados colombianos.

**Tabla VII.** Producción y valor estimado para la producción mensual

Producto	Unidad	Valor unitario (COP)	Unidades Producidas (mes)	Total ventas (COP)
Pectina	kg	\$ 120.000	2,61	\$ 313.200
Harina	kg	\$ 2.600	10,89	\$ 28.314
Aceite	mL	\$ 1.500	901,8*	-
Hidrolato	mL	\$ 82	135.000	\$ 11'070.000
Limoneno	mL	\$ 2.200	766,53*	\$ 1'686.366
<b>Total</b>				<b>\$ 13'097.880</b>

\*La producción de aceite y limoneno se asume mutuamente excluyente para el análisis económico, estimando la producción del limoneno como el 85 % del aceite.

Con la información de las Tablas V-VII se estimaron la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto (VPN) y la relación beneficios/costos, suponiendo una inversión de \$174'946.605 COP para cubrir costos, gastos y operaciones durante el primero de los 10 años que se suponen como vida útil del proyecto. Una depreciación anual de equipos de \$ 2'593.997 COP y un valor de salvamento del proyecto asumido como el 20 % de la inversión inicial, es decir \$ 34'989.321 COP. Otras suposiciones para el análisis económico incluyen un incremento anual en los costos de 4,8 % (tomando como referencia los últimos cinco años en la inflación en Colombia), una tasa de oportunidad del 9 % (según datos del Departamento Nacional de Planeación) y un préstamo de \$ 87'473.303 COP, es decir, del 50 % de la inversión inicial [33], con una tasa de interés anual del 12 % y una proyección de 10 años. También se utiliza para el análisis un índice de precios al consumidor (IPC) de 3,5 % e impuestos a la renta del 29 %. En este sentido, se esperan los ingresos por venta y costos de operación mostrados en la Tabla VIII.

Con la información descrita, el VPN se calcula en \$ 27'271.933 COP, la TIR en 5,27 % y la relación beneficio costo (I B/C) en 1,31, indicando que, a la escala de producción analizada, la inversión presenta índices de rentabilidad positivos que pueden llegar a superar tasas de oportunidad

**Tabla VIII.** Ingresos por venta y costos de operación (en millones de pesos colombianos)

Periodo	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Ingresos venta</b>	157,2	162,7	168,4	174,3	180,4	186,7	193,2	200	207	214,2
<b>Costos operación</b>	124,5	130,5	136,7	143,3	150,2	157,4	164,9	172,9	181,2	189,9

y riesgos financieros. No obstante, es importante considerar diversos escenarios (tanto positivos como negativos) frente a las suposiciones realizadas en este estudio, considerando aspectos como la variabilidad en los precios asumidos para los diferentes productos y que no necesariamente serán tan conservadores en un contexto real; la escala de producción que dentro de una idea o plan de negocio puede ser superior a la usada en este estudio; o valorar el potencial impacto ambiental del proyecto al contribuir con una disminución en la generación de residuos, lo que eventualmente puede captar apoyos o financiación estatal o de entidades no gubernamentales disminuyendo los costos de inversión, entre otros. En cualquier caso y dado el relativo bajo nivel de producción supuesto al tomar como base la escala laboratorio, los indicadores VPN, TIR y B/C permiten suponer que, incluso frente a peores escenarios, la valoración de residuos de naranja mediante el esquema de biorrefinería propuesto en esta investigación continuará siendo atractivo como inversión financiera, además de contribuir positivamente al impacto en el ambiente por utilizar desechos como materia prima.

## 4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados de esta investigación, incluso para una pequeña escala de producción y con el uso de tecnologías de fácil adaptación, es posible considerar el aprovechamiento integral de la cáscara de naranja para ayudar a mantener competitivo el mercado de este cítrico de manera amigable con el ambiente, ofreciendo una nueva gama de posibilidades para los pequeños y medianos productores de regiones específicas del país, donde la contratación de personal calificado o la inversión para la implementación de técnicas o procesos más elaborados pueda resultar complicada.

Como aspecto novedoso de esta investigación se tiene la separación de la materia prima (cáscara de naranja) para extraer el aceite solo de la corteza exterior (flavado), la pectina de la corteza interior (albedo) y harina para suplemento animal de los residuos resultantes de dichos procesos. De acuerdo con indicadores económicos como TIR y VPN, bajo ese esquema de producción y el uso o comercialización de subproductos como el hidrolato o la valoración del aceite para su comercialización como limoneno, se puede plantear un modelo de negocio que vale la pena ser considerado por pequeños y medianos productores dentro de la industria de los cítricos en el país.

## Referencias

- [1] C. Caldeira, A. Vlysidis, G. Fiore, V. De Laurentiis, G. Vignali and S. Sala, "Sustainability of food waste biorefinery: A Review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment", *Biore-source Technology*, vol. 312, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123575> ↑368
- [2] M. Patsalou, A. Chrysargyris, N. Tzortzakis and M. Koutinas, "A biorefinery for conversion of citrus peel waste into essential oils, pectin, fertilizer and succinic acid via different fermentation strategies", *Waste Management*, vol. 113, pp. 469-477, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.020> ↑368, 369



- [3] G. Mao, D. Wu, C. Wei, W. Tao, X. Ye, R. J. Linhardt, C. Orfila, S. Chen, "Reconsidering conventional and innovative methods for pectin extraction from fruit and vegetable waste: Targeting rhamnogalacturonan I", *Trends in Food Science & Technology*, vol. 94, pp. 65-78, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.001> ↑368
- [4] L. V. Peñaranda, S. P. Montenegro y P. A. Giraldo, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia", *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 2, pp. 141-150, 2017. ↑368, 370
- [5] A. G. Manrique, "Visión general del aprovechamiento de residuos cítricos como materia prima de biorrefinerías", *Cuadernos del Tomás*, no. 10, pp. 153-168, 2018. ↑368, 370
- [6] A. K. Tovar, L. Godínez, F. Espejel, R.-M. Ramírez-Zamora, and I. Robles, "Optimization of the integral valorization process for orange peel waste using a design of experiments approach: Production of high-quality pectin and activated carbon", *Waste Management*, vol.85, pp. 202-213, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.029> ↑368, 373
- [7] D. L. Ortíz, E. Batuecas, C. E. Orrego, L. J. Rodríguez, E. Camelin, and D. Fino, "Sustainable management of peel waste in the small-scale orange juice industries: A Colombian case study", *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121587> ↑368
- [8] E. Tsouko, S. Maina, D. Ladakis, I. Kookos, and A. Koutinas, "Integrated biorefinery development for the extraction of value-added components and bacterial cellulose production from orange peel waste streams", *Renewable Energy*, vol. 160, pp. 944-954, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.108> ↑368
- [9] M. Pourbafrani, G. Forgács, I. S. Horváth, C. Niklasson, and M. Taherzadeh, "Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes", *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 11, pp. 4246-4250, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.077> ↑369
- [10] M. Lohrasbi, M. Pourbafrani, C. Niklasson, and M. Taherzadeh, "Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products", *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 19, pp. 7382-7388, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.078> ↑369
- [11] J. J. Senit, D. Velasco, A. Gomez, M. Sanchez-Barba, J. M. Toledo, V. Santos, F. Garcia- Ochoa, P. Yustos, M. Ladero, "Orange peel waste upstream integrated processing to terpenes, phenolics, pectin and monosaccharides: Optimization approaches", *Industrial Crops and Products*, vol. 134, pp. 370-381, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.060> ↑369
- [12] M. Boukroufa, C. Boutekedjiret, L. Petigny, N. Rakotomanomana, and F. Chemat, "Bio- refinery of orange peels waste: A new concept based on integrated green and solvent free extraction processes using ultrasound and microwave techniques to obtain essential oil, polyphenols and pectin", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 24, pp. 72-79, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.11.015> ↑369
- [13] M. Ortiz-Sanchez, J.-C. Solarte-Toro, J.-A. González-Aguirre, K. Peltonen, P. Richard, and C. A. Cardona Alzate, "Pre-feasibility analysis of the production of mucic acid from orange peel waste under the biorefinery concept", *Biochemical Engineering Journal*, vol. 161, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107680> ↑369, 372
- [14] J. F. Murcia, A. N. Ardila, R. Barrera, "A Bio-refinery approach from pineapple in the context of non-technified crops: The Choco-Colombian region", *Agricultural Reviews*, Vol. 41 (4), 2020, pp. 317-327, 2020. ↑369
- [15] Y. A. Vargas y L. I. Pérez, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente", *Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 14, no. 1, 59-72, 2018. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108> ↑370
- [16] A. M. Trujillo, *Plan de negocio para el aprovechamiento de residuos de naranja en Bogotá D.C. y la generación de oportunidades innovadoras y sostenibles con miras al mercado internacional*. Bogotá, Colombia, Universidad Piloto de Colombia, 2019. ↑370
- [17] S. M. Yepes, L. J. Montoya y F. Orozco, "Valorización de residuos agroindustriales - frutas - en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia", *Facultad Nacional de Agronomía*, vol. 61, no. 1, pp. 4422-4431, 2008. ↑370
- [18] J. P. Rojas, A. Perea y E. E. Stashenko, "Obtención de aceites esenciales y pectinas a partir de subproductos de jugos cítricos", *Vitae*, vol. 16, no. 1, pp. 110-115, 2009. ↑370, 371, 372, 373
- [19] I. Cerón-Salazar y C. Cardona-Alzate, "Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja", *Ingeniería y Ciencia*, vol. 7, no. 13, pp. 65-86, 2011. ↑370, 372
- [20] E. P. Hurtado y A. L. Villa (2016), "Estudio de mercado aceite esencial de naranja en Colombia en el período 2009-2014", *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 10, no. 2, pp. 301-310, 2016. ↑370, 373
- [21] K. A. Rodríguez y A. M. Román, *Extracción y evaluación de pectina a partir de la cáscara de naranja de las variedades Citrus sinensis y Citrus paradisi y propuesta de diseño de planta piloto para su producción* (Tesis de

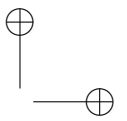
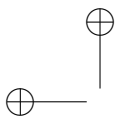
- grado), Universidad de El Salvador, 2014. ↑370, 372
- [22] F. Araque y R. E. Moscoso, *Propuesta de diseño del proceso productivo para la obtención de pectina a base de residuos cítricos en Colombia, de acuerdo a las necesidades técnicas, comerciales y financieras requeridas* (Tesis de grado), Pontificia Universidad Javeriana, 2013. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/6353> ↑370
- [23] M. Güzel, and Ö. Akpınar, “Valorisation of fruit by-products: Production characterization of pectins from fruit peels”, *Food and Bioproducts Processing*, vol. 115, pp. 126-133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.03.009> ↑370, 374
- [24] V. Acevedo y D. M. Ramírez, *Análisis técnico y económico de la pectina, a partir de la cáscara de la naranja (Citrus sinensis)* (Trabajo de grado), Universidad de San Buenaventura Cali, 2011. ↑371
- [25] M. Escalante, I. Santos, L. B. Rojas y C. Lárez, “Aprovechamiento de desechos orgánicos: 1. Extracción y caracterización del aceite de semillas de naranja colectadas en expendios ambulantes de jugos”, *Avances en Química*, vol. 7, no. 3, pp. 181-186, 2012. ↑371
- [26] R. Barrera, A. L. Villa y C. Montes de Correa, “Limonene Epoxidation: Diffusion and Reaction over PW-Amberlite in a Triphasic System”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 45, no. 13, pp. 4589-4596, 2006. <https://doi.org/10.1021/ie060098b> ↑371
- [27] R. Vásquez, L. Ruesga, R. D’Addosio, G. Páez y M. Marín, “Extracción de pectina a partir de la cáscara de plátano (Musa AAB, subgrupo plátano) clon hartón”, *Revista de la Facultad de Agronomía*, vol. 25, no. 2, pp. 318-333, 2008. ↑372, 374
- [28] H. A. Arias y H. J. Tuiran, *Obtención de pectinas cítricas a base de las cáscaras de naranja desechadas de los diferentes puestos de refresquerías de la ciudad de: Santa Marta* (Trabajo de grado), Universidad del Magdalena, 2009. ↑372, 374
- [29] L. H. Reichembach, and C. L. de Oliveira Petkowicz, “Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties”, *Carbohydrate Polymers*, vol. 245, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116473> ↑372
- [30] C. Sáenz, A. M. Estévez y S. Sanhueza, “Utilización de residuos de la industria de jugos de naranja como fuente de fibra dietética en la elaboración de alimentos”, *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, vol. 57, no. 2, pp. 186-191, 2007. ↑372, 374
- [31] J. A. Siles, Q. Li, and I. P. Thompson, “Biorefinery of waste orange peel”, *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 30, no. 1, pp. 63-69, 2010. <https://doi.org/10.3109/07388550903425201> ↑372
- [32] National Academy of Sciences. *Food Chemicals Codex*. Washington: National Academy Press, 1996. ↑374
- [33] C. C. Redondo y A. P. Báez, *Análisis financiero para la obtención de un crédito constructor* (Trabajo de grado). Universidad Libre Seccional Cúcuta, 2015. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10901/11805> ↑376

### Santiago Bedoya Betancur

Estudiante de Maestría en Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Ingeniero Químico de la Universidad Nacional, Medellín, Colombia. Docente-Investigador en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (PCJIC) (Medellín, Colombia), integrante del Grupo de Investigación CERES - Agroindustria & Ingeniería, Investigador en el grupo CAMER (Catálisis Ambiental y Energías Renovables) y Coinvestigador del proyecto Producción de Ácido Clavulánico en Colombia, financiado por Colciencias.  
Correo electrónico: [sabedoyab@unal.edu.co](mailto:sabedoyab@unal.edu.co)

### Sebastian Amar Gil

Estudiante de Maestría en Ingeniería e Ingeniero Químico de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Investigador Principal y Coinvestigador en diversos proyectos adscritos al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid en el Grupo de Investigación Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER) e integrante del Grupo de Investigación CERES - Agroindustria & Ingeniería.  
Correo electrónico: [ssebastian.amar@udea.edu.co](mailto:ssebastian.amar@udea.edu.co)



---

**Rolando Barrera Z**

Doctor en Ingeniería, Magíster en Ciencias Químicas e Ingeniero Químico de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Profesor (escalafón: asociado) del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia y Coordinador del Grupo de Investigación CERES - Agroindustria & Ingeniería.  
Correo electrónico: rolando.barrera@udea.edu.co

---

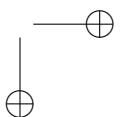
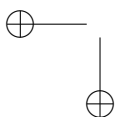
**Erasmus Arriola V**

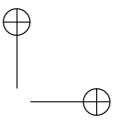
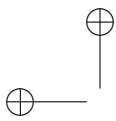
Magíster en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. Docente de la Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Integrante del Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER).  
Correo electrónico: yackko@gmail.com

---

**Alba N. Ardila A**




Doctora en Ciencias (Ingeniería Química) de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa de México D.F., Magíster en Ciencias Químicas y Licenciada en Biología y Química de la Universidad de Antioquia. Profesora Titular adscrita al Programa de Tecnología en Química Industrial de Laboratorio de la Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Directora del Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER).  
Correo electrónico: anardila@elpoli.edu.co





## Characterization of Traffic for Live Video Streaming Services on DASH in 4G Networks Based on Syntactic Analyzers

*Caracterización de tráfico para el servicio de Video Streaming en vivo sobre DASH en redes 4G basado en analizadores sintácticos*

**Héctor Fabio Bermúdez Orozco\***<sup>1</sup>, **Wilmar Yesid Campo Muñoz**<sup>1</sup>,  
**Evelio Astaiza Hoyos**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

\*correspondence e-mail: hfbermudez@uniquindio.edu.co

Recibido: 07/05/2021. Modificado: 19/07/2021. Aceptado: 23/07/2021.

### Abstract

**Context:** Mobile data traffic generated by video services increases daily. To address this situation, telecommunication service providers must know the behavior of video traffic and thus adjust network resources to meet and maintain the quality levels required by users. Traffic characterization studies in 4G networks for Live Video Streaming (LVS) services are scarce, and those available are obtained from simulation scenarios in which the real operating conditions of these types of networks are not considered.

**Method:** This work focuses on finding a model that characterizes traffic from the probability density functions of LVS services under the adaptive streaming DASH technique in LTE networks. The traces analyzed to carry out the modeling study were acquired in real emulation scenarios considering the operating conditions frequently presented in the actual provision of the service, for which five test scenarios were defined.

**Results:** Based on the parameterization of a number of probability density functions found, a description of different traffic models of the service under study is presented, as well as for each of the pre-established test scenarios in a 4G-LTE network.

**Conclusions:** From the results, it is concluded that the traffic model depends on the conditions of each scenario, and that there is no single model that describes the general behavior of LVS services under the adaptive streaming DASH technique in an emulated LTE network.

**Keywords:** LTE, probability density function, live video streaming, traffic model

**Acknowledgements:** Universidad Politécnica de Cartagena - Spain, Universidad del Quindío - Colombia.

**Language:** English

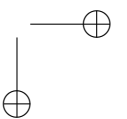
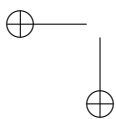
### Open access



Cite this paper as: Bermúdez-Orozco, H., Campo-Muñoz, W., Astaiza-Hoyos, E.: Characterization of Traffic for Live Video Streaming Services on DASH in 4G Networks Based on Syntactic Analyzers. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 381:400.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.17960>



### Resumen

**Contexto:** El tráfico de datos móviles generado por los servicios de video aumenta a diario. Para enfrentar dicha situación, los proveedores de servicios de telecomunicaciones deben conocer el comportamiento del tráfico de video y así ajustar los recursos de la red que permitan satisfacer y mantener los niveles de calidad requeridos por los usuarios. Los estudios de caracterización de tráfico en redes 4G para el servicio Live Video Streaming (LVS) son escasos y los disponibles son obtenidos a partir de escenarios de simulación en los cuales no se consideran las condiciones reales de funcionamiento de este tipo de redes.

**Método:** Este trabajo se centra en encontrar un modelado que caracterice el tráfico a partir de las funciones de densidad de probabilidad del servicio LVS bajo la técnica de streaming adaptativo DASH en redes LTE. Las trazas analizadas para realizar el estudio del modelado fueron adquiridas en escenarios reales de emulación considerando las condiciones de funcionamiento frecuentemente presentadas en la prestación real del servicio, para lo cual se definieron cinco escenarios de prueba.

**Resultados:** Se presenta la descripción, a partir de la parametrización de algunas funciones de densidad de probabilidad encontradas, de diferentes modelos de tráfico del servicio bajo estudio y para cada uno de los escenarios de prueba preestablecidos en una red 4G-LTE.

**Conclusiones:** A partir de los resultados, se concluye que el modelo de tráfico depende de las condiciones de cada escenario y que no existe un modelo único que describa el comportamiento general del servicio LVS bajo la técnica de streaming adaptativo DASH en una red LTE emulada.

**Palabras clave:** LTE, función de densidad de probabilidad, video streaming en vivo, modelo de tráfico

**Agradecimientos:** Universidad Politécnica de Cartagena - España, Universidad del Quindío - Colombia.

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

The current growth of user subscriptions and video streaming services has generated an exponential increase in traffic in mobile cellphone networks. By late 2020, and according to [1], 8,1 billion users of mobile wireless networks were registered worldwide, with an expected growth of up to 8,9 billion by 2025. Out of this number of users, 50 % will use the LTE wireless access technology, 25 % will use access technologies proposed by 5G, and 25 % will use other technologies (WCDMA/HSPA, GSM/EDGE, etc.). The generated mobile data traffic is estimated at 164 Exabytes by 2025, of which 76 % corresponds to video services [1].

Currently, deployment has begun globally of the 5G network infrastructure. This migration has been defined by the 3GPP from 3GPP TR 21.915 V15.0.0 (2019-09) [2], which defines two possible configurations: independent and non-independent. The independent configuration uses only one radio access technology, whereas the non-independent configuration combines multiple ones. Due to the above, in the Latin American landscape, it is believed that the option to be adopted by the operators, given its economic benefits, capacity expansion, use of frequency bands, and introduction of the technology, is the non-independent configuration (option 3) [2], which uses core LTE (EPC), an evolved node B (eNB) that acts as master and a 5G base station (en-gNB) or NR, which acts as secondary node. The user station would have dual connectivity with the master and secondary nodes, as illustrated in Fig. 1.

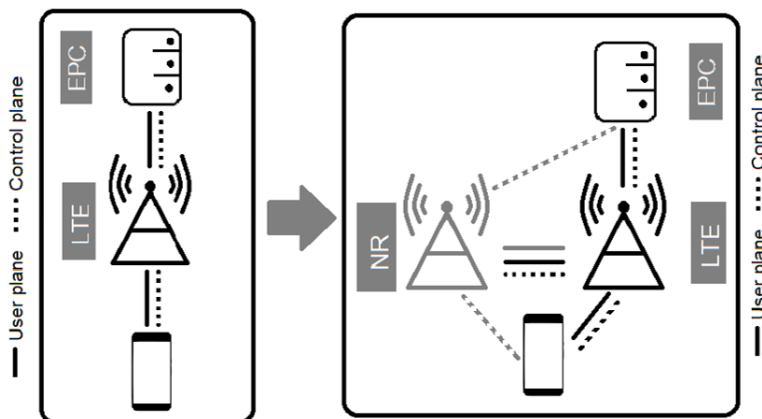


Figure 1. 3GPP non-independent architecture, option 3 [2]

Within this context, user traffic under this migration configuration continues to completely or partially circulate through the LTE access and always through the LTE core, which is why it is of vital importance to deploy the 5G network in developing countries and analyze the traffic behavior prevalent in the network, such as live video streaming (LVS) to keep the LTE core from becoming the bottleneck in the migration process, thus allowing to determine, together with user behaviors, the implementation times of new phases in the 5G start-up process.

The streaming technique used to support video services, specifically video on demand (VoD) and LVS, use the Hypertext Transfer (HTTP) protocol [3]. HTTP streaming is improved by using adaptive streaming techniques. The most popular of these include the HTTP Smooth Streaming (HSS) protocol [4], HTTP2 Live Streaming – HLS [5], HTTP Dynamic Streaming – HDS [6], and the Dynamic Adaptive Streaming protocol over HTTP (DASH), the latter being the international standard ISO/IEC 23009-1:2012 adopted for LTE networks [7].

Regarding the aforementioned, and due to the high level of video traffic in wireless networks, it is necessary for telecommunication operators to make decisions that guarantee minimum conditions in the quality of the services offered to users. Hence, in network and resource management and administration activities, it is of paramount importance to have tools such as traffic models that characterize the behavior of the networks. Although there are mathematical models and simulation environments that allow characterizing data traffic in wireless networks, these lack truthful information of the real conditions of the environment [8]. In response to this situation, there is currently great interest by the academic and scientific communities in the use and development of test platforms of communication systems that consider real operating conditions. Within this context, traffic models obtained from real operating environments have a high degree of acceptance, and they allow characterizing traffic behavior in the networks without affecting the operation of current systems. [9] presents different approaches to studying traffic modeling, which consider test benches, simulation, emulation environments, and mathematical models. Among these, emulation environments are a hybrid between simulation approaches and test bench that seeks to improve the

disadvantages of one with the advantages of the other. Currently, this type of approach has a high degree of acceptance.

Within the context of the emulation scenario approach to conducting traffic characterization studies, in [10], the authors present the traffic characterization of a VoD service in an IPTV network and use a lexical analyzer designed for this activity to facilitate the study. In [11], the authors perform a traffic characterization for the VoD service on HFC networks using the RTMP protocol. In [12], the researchers study and characterize the VoD traffic for IPTV networks, propose an optimization problem, and present its solution through a sub-optimal model. The authors in [13] study, analyze, and model the traffic generated by the interactive services of a Virtual Academic Community (VAC), with high-quality audio and video content typical of the IPTV environment, where the main service is that of VoD supported on IPTV technology. In [14], the authors explore some aspects of the IPTV streaming modeling and present general studies involving generators of synthetic video traces. In addition, they conclude that it is important to study the IPTV parameters before implementing the service in order to evaluate architecture alternatives to configure the network that allows obtaining the best performance. [15] presents the techniques to model and predict video traffic statistically, which is highly useful in the development of this work, but it focuses only on modeling the data traffic with ARIMA time series, specifically with the SARIMA model. Furthermore, the authors argue that it is the most precise form to describe IPTV traffic. The previous works focus on characterizing traffic over IPTV networks. [16] presents an approach to an analytic traffic model of the HTTP adaptive video streaming service, which corresponds to the first model reported in the literature for this type of service. The analytic model proposed is comprised of three components: a video server model, a model for the IP network between the client and the server, and a client model for video playback. To obtain the analytic model, the simulation approach is used, where a model of nested queues is assumed in order to simulate the whole system. Moreover, it is assumed that the traffic of packages presents a binomial distribution. As an additional contribution, this work sought to find the traffic model from an emulation environment, which employs real elements and the consumption of the service in real time, where many of the assumptions given in the simulations are diminished.

According to the above, the characterization process of data traffic includes generation processes of the conceptual model of the service, traffic capture, audio identification, video frames that constitute the traffic under study, and the identification of the PDF that describes its behavior [13]. In this context, the video codecs use the image structure (frames) called Group of Pictures (GoP), which consists of a reference slice coded independently (slice I), followed by a sequence of slices P and B, in which there are only changes of movement with respect to the reference previously coded slice. In addition to these slices, there is the audio information [17]. Due to the degree of difficulty involved in capture, identification, filtering, and exportation activities of each of the slices that make up the video streaming services, which also allow characterizing traffic, it is necessary to use tools such as lexical or syntactic analyzers [10], which permit speeding up these types of processes.

This work sought to characterize LVS traffic in an emulated LTE network that uses the DASH adaptive streaming technique. The principal contributions of this work are the following: (i) designing a syntactic analyzer that facilitates the traffic characterization tasks of the service under study; (ii) providing network operators and the scientific community with a tool that describes the traffic



of the LVS service in an LTE network and uses the DASH adaptive streaming technique, which can be used in activities involving the management and administration of networks and resources; and (iii) studying the behavior of the proposed traffic based on traces obtained from a real LTE network, without depending on assumptions or studies from other particular research scenarios.

This article is organized as follows: section 2 presents the methodology used in this research; section 3 shows the results and their discussion; and section 4 presents the conclusions.

## 2. Methodology

To conduct the study that allows characterizing the traffic from LVS services in an emulated LTE network, the DASH adaptive streaming technique is used, as well as the emulation scenario presented in Fig. 2, adapted from [18] and validated by the authors in [19], [20]. The emulation scenario is made up of a real video server, an LTE network constructed through the NS3 tool, and a client (User Equipment, UE). An overview of the equipment and software used in the test bench is shown in Table I. This scenario uses five test environments. In the first environment, a static UE is located at 30 m from the eNB; in the second, third, and fourth environments, the UE moves away from the evolved Node B (eNB) with rates of 1, 2, and 3 mps in a direction that follows a straight line  $y = x$ ; and, in the fifth environment, the UE moves around the eNB with random direction and rate. For all the test environments, four video categories were selected for transmission: interview (category A), cartoons (categories B and D), football match (category C), and movie (category E), which are adjusted to the spatial-temporal characteristics defined in Annex I, from the ITU-T 910 recommendation [21]. For each type of video, 10 tests are carried out, each lasting 180 s, which is consumed by a client. Upon reproducing the video, the traffic traces are extracted in the receptor (client). These traces are then captured with the Wireshark traffic analysis software [22]. Thereafter, to obtain the traffic mathematical model, it is necessary to extract the audio and video frames from the traffic traces, specifically the arrival times, image sizes, and types of slices. Next, through statistical analysis, the PDF that describes the behavior of each of the components of the service, which corresponds to the mathematical model, is identified.

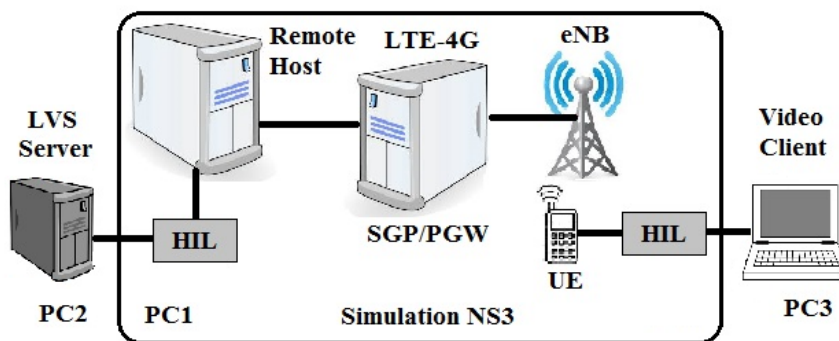


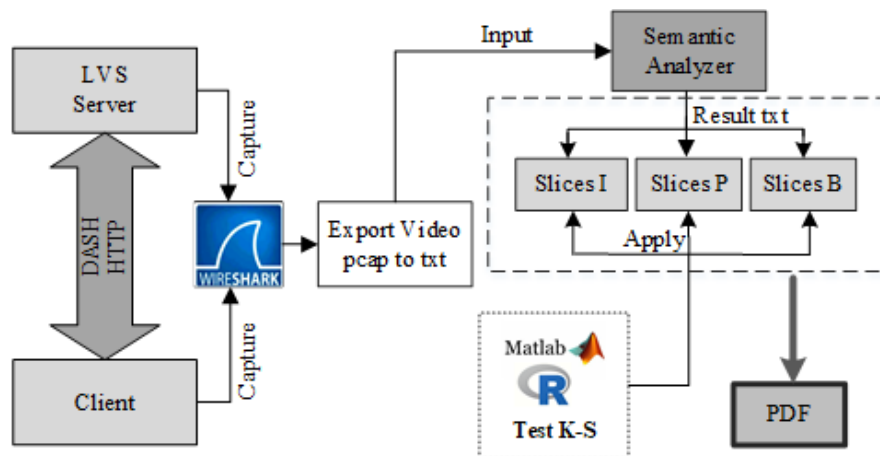
Figure 2. Emulated scenario



**Table I.** Characteristics of the PCs used in the emulation system

PC	Characteristics	Operative system	Software
<b>PC -1 LTE emulated in NS3</b>	Intel Core 2 at 2.13 GHz, with 4 GB of RAM	Linux Ubuntu 14.04 LTS	NS3.26
<b>PC -2 Server</b>	Intel Core i7-3612QM CPU at 2.1GHz, 8 GB of RAM	Windows 7 Professional	Wowza streaming engine Wireshark
<b>PC -3 Customer</b>	Intel Core 2 Duo CPU at 2.1GHzx2, 4 GB of RAM	Windows 7 Professional or Linux Ubuntu	VLC Akamai Adaptive media player Wireshark

Fig. 3 shows the functional scheme used in the traffic characterization process. To speed up the process of extraction of parameters from the traffic traces, the proposed syntactic analyzer was used.



**Figure 3.** Functional scheme of the traffic characterization process

## 2.1. Emulation scenario

Fig. 2 presents a diagram of the implemented emulated scenario. PC1 is used to simulate the LTE network with NS3.26 on Linux Ubuntu. The other two PCs act as Client-Servers and connect to PC1 through the Ethernet. PC2 uses the *Wowza Streaming Engine* software [23] as a video server. The Wowza server is compatible with adaptive streaming technologies. For which it employs files from the Synchronized Multimedia Integration Language (SMIL), which allows using flows of various rates of bits in groups for transmission of bitrate-adaptive HTTP. PC3 implements a web-based video reproduction application developed with Apache HTTP [24]. In both PC2 and PC3, the open-access traffic analysis software and *Wireshark* protocols were installed [22]. PC1 hosts the LTE

network simulated with the LENA tool over NS3 [25]. The LTE network is composed of various nodes: a remote host node, a Serving Gateway/Packet Data Network Gateway (SGW/PGW), an eNB node, and a user equipment (UE) node that acquires the role of mobile device. Thus, real video traffic arrives at the UE node injected into the system through the real LVS server from the simulated LTE network. To allow communication between PC2-Host-Remote and UE-PC3, a Hardware in the Loop (HIL) tool is used, which allows using PC1 as a black box with virtual components. This black box receives and delivers data to the extreme real systems, PC2 and PC3 [18]. Tables II and III show the initial configuration parameters and adjustments for the emulation tool constructed in the test environment.

Table II. LTE network setup

Parameter	Description
eNB operating power	50 dBm
Physical layer configuration	OFDMA, FDD, Band 7, Freq. DL= 2,644 MHz, Freq. UL=2,535, BW cell UL=DL=10 MHz, Nro RB: DL=UL=50.Mod. QPSK
Type of Antenna	Cosine, height 1,5 m
Propagation Model	Nakagami (m= 5)
UE Configuration	26 dBm, height 1,5m, 1-900m from eNB
Figure of noise eNB	2 dB
Figure of noise UE	7 dB
Transmission mode	SISO

Table III. Coding setup

Parameter	Description
<b>Video coding</b>	
Encoder	H.264/MPEG-4 AVC: Baseline Profile (BP)
Resolution (px)	240p (426x240); 360p (640x360); 480p (854x480); 720p(1280x720); 1080p (1920x1080).
Bit encoding rate (Kbps)	528 for 240p; 878 for 360p; 1128 for 480p; 2628 for 720p;4628 for 1080p
Frames per second	30
<b>Audio coding</b>	
Encoder	AAC
Channels	Stereo
Bits rate (Kbps)	96 for 240p; 128 for 360p, 480p; 192 for 720p, 1080p
Sample frequency	44.100

## 2.2. Live video service

To carry out this study, the *Wowza Streaming Engine* video server was used, which uses the H.264/MPEG-4 AVC as encoder; the LVS service in LTE networks uses the Baseline Profile (BP) [26]. In the process of encoding a video frame under the H.264 standard, it must be considered

that it is divided into two main layers: a first layer called video coding layer (VCL), where the video coding process takes place (Fig. 4); and a second layer called network abstraction layer (NAL), which is in charge of adapting the information that the VCL delivers towards a diverse number of technologies for storage and transport of compressed contents. After the VCL, the video is organized into a 'NAL Unit', comprised of a heading, where the type of data from the NAL is indicated, and another bigger part of the unprocessed byte stream payload (RBSP). NAL units may be classified according to their information: possibly VCL NAL units, if these refer to data from the video slice; and non-VCL units, when these are only for control, which, in turn, could be a set that can be applied to various VCL NAL.

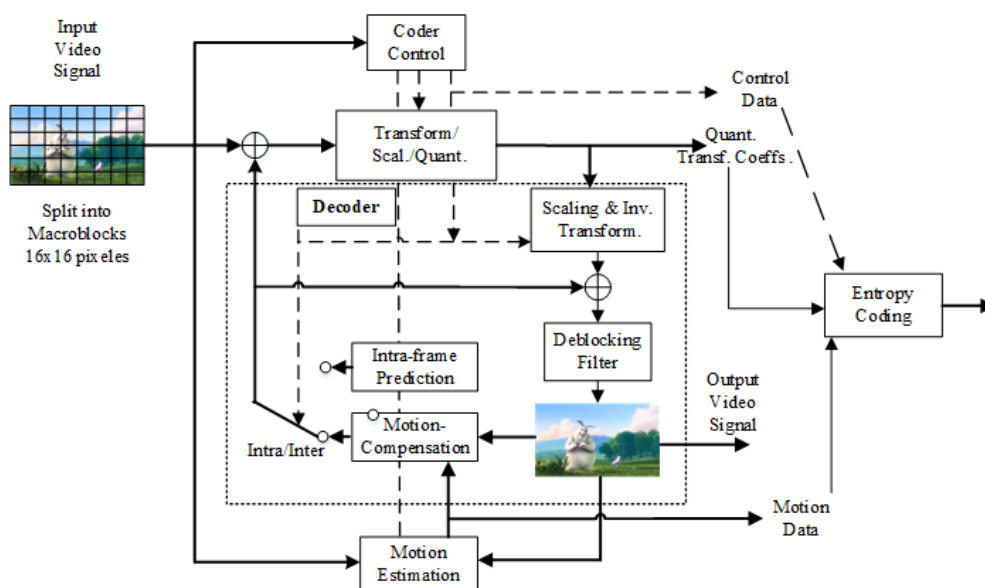


Figure 4. Scheme of the H.264 encoder

### 2.3. Syntactic analyzer

Due to the high volumes of traffic present in a live video service, among the activities requiring the greatest time and work for characterization is the identification of audio and video slices, specifically of the type of video slice (I, P, or B), arrival times, and size. These slices are delivered to the network in an interlaced manner, which makes the data identification and extraction process a complex task. The proposed syntactic analyzer speeds up these activities, automating the slice type identification process through a Matlab® script, automatically delivering the information required for later analysis. For an idea of the high volume of traffic manipulated by the LVS service, Fig. 5 shows, by means of a curve, the packages captured in 60 s for a particular test lasting 180 s. Audio (red) and video (blue) traffic is observed in the form of bars obtained with the *Wireshark* tool.

The information presented in this format from Fig. 5 allows visualizing the substantial differences between the video and audio throughputs. Additionally, at package level, it could be intuitively stated that the size of the audio shows a uniform behavior, which must be confirmed by obtaining the PDF for this type of slice. However, when the video is made up of the GOP (I, P, B), it needs a more granular analysis, that is, it is necessary to identify the video components and the PDF that represents its behavior. At this point, the proposed syntactic analyzer contributes to automatically identifying, separating, and exporting information on the video and audio slices from the real traffic traces obtained from the experimental scenario.

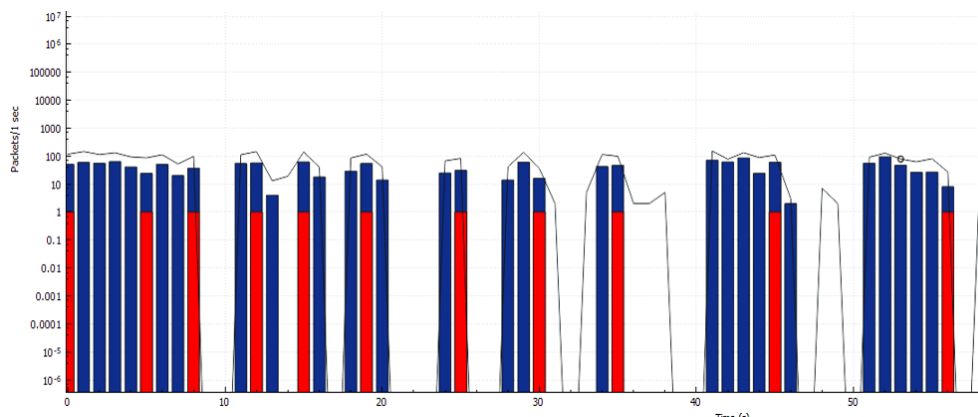


Figure 5. Total packages captured in a test with Wireshark

The tokens are the inputs of a syntactic analyzer, which, in this case, are the traffic traces acquired with *Wireshark* in plain text format. In the first place, the analyzer identifies, through the *Word* variable, if it is an audio or video *slice*; if it corresponds to an audio *slice*, the arrival time and size are identified. If, on the contrary, it is a video *slice*, the GOP type must also be identified. Fig. 6 shows the flow diagram of the proposed syntactic analyzer.

While identifying the type of GOP for the video slices, the GOP initiation key word is searched. In this case, and considering the international standard ISO/IEC 13818-1 [27] and what was presented by [28] and [29], this key is defined as '00 00 00 01'. When this identification sequence of the GOP is found, the two bytes located after this identifier are analyzed; of these two bytes, the last one, which is hexadecimally encoded, contains information on the type of slice. To extract information from this byte, the least significant bit must be selected from the first hexadecimal character, as well as the most significant bit from the second hexadecimal character. According to [17], the type of slice is coded in the following manner: 00 = P, 01 = B, and 10 = I. Fig. 7 presents an example of this, where the *Word* variable defines that it is dealing with a video *slice*. Additionally, the slice arrival time and size are observed, in addition to identifying the reassembled TCP segments. After the word identifying the GOP, the following two bytes appear: 00 01. To identify the type of slice, the third and fourth hexadecimally coded characters coded are used: 01H (0000 0001). The bits that encode are highlighted in bold. In binary, the type of slice, for this case 00, corresponds to a type P slice.

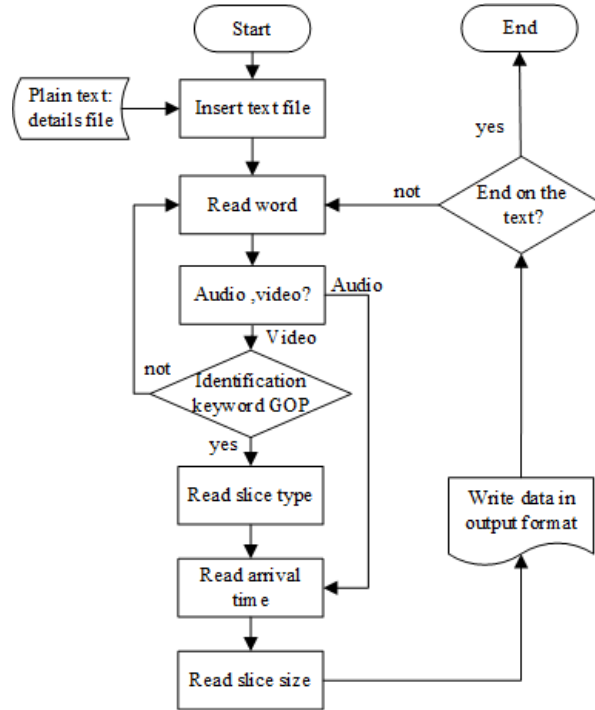


Figure 6. Flow diagram of the proposed syntactic analyzer

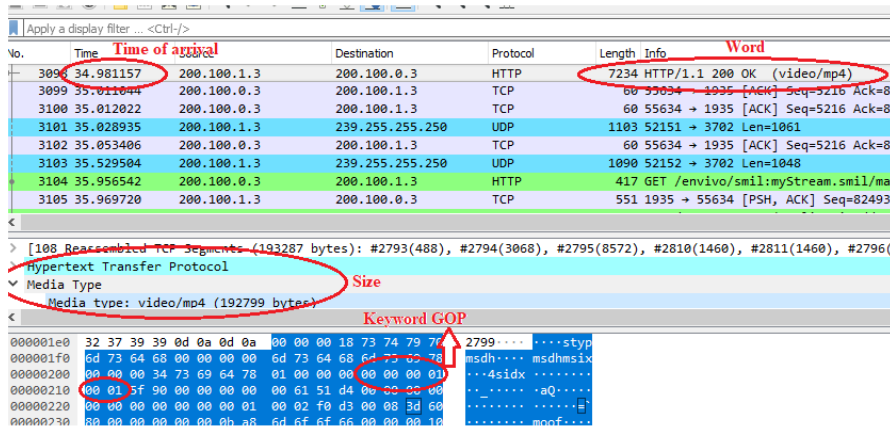


Figure 7. Screenshot of traffic trace with Wireshark

Finally, the output of the syntactic generator delivers the corresponding identification information of the slices (audio and video), type of slice (I, P, or B), arrival times, and size. With this information, and with help from the Matlab *dfitool* tools [30] and the R statistical analysis software [31], a

subsequent statistical analysis is conducted by typing the probability density functions (PDFs) that describe the behavior under study.

From the results delivered by the syntactic analyzer, the R statistical analysis software is used for prior data analysis. For this task, the data provided by the syntactic analyzer are loaded and the box-whisker plot tool is used, which is a visual representation that describes the dispersion and symmetry of the data to be analyzed; the information is observed in a box-whisker plot (Fig. 8). Thus, i) the median is represented by the box line; ii) the interquartile range box distance between the first and third quartiles,  $Q3-Q1$ , represents 50 % intermediate of the data; and iii) the whiskers, which extend from any side of the box, represent the ranges of 25 % of the data values from the lower part and 25 % from the upper part, excluding the outlier values. The asymmetry of the diagram indicates that the data may not be distributed normally. Atypical data (extreme and mild) are eliminated, which, according to the Tukey test, are the extreme outliers, while the mild outlier values are kept for this analysis [32].

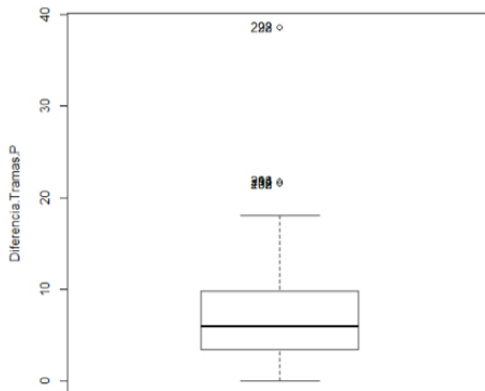


Figure 8. Box-whisker plot

## 2.4. Null hypothesis ( $H_0$ )

The null hypothesis ( $H_0$ ) is selected with *dfittool*, which is an application by Matlab capable of interactively adjusting the probability density distributions of data imported from *Workspace* and has 22 PDF available for analysis. With *dfittool*, it is possible to visualize the set of stored data through a histogram, which is overlaid by a PDF trying to fit it. The curve that best fits the histogram is the null hypothesis. This null hypothesis is validated through the Kolmogorov-Smirnov (K-S) goodness-of-fit test [33], for which a script was developed in Matlab, which allowed measuring the degree of correlation existing between the distribution of the set of practical data and the theoretical distribution (null hypothesis). With the *dfittool* tool, the *evaluate* function is used. This function allows creating vectors with the cumulative distribution function (CDF), size or arrival times of each set of plots, from which the goodness-of-fit test was performed, which takes this CDF and the set of samples from the traffic as input parameters. To calculate the contrast variable ( $D_\alpha$ ), with a

95 % confidence interval, Equation (1) is used, as well as for the K-S test with a 0,05 significance level and is applied for values above 50 samples.

$$D_{0,05} = \frac{1,36}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

where  $N$  is the number of samples.

Thereafter, the cumulative probability observed (CPO) of the samples of each slice is calculated, which corresponds with the CDF of the practical data. The cumulative probability expected (CPE) of the null hypothesis corresponds to the CDF generated with the *evaluate* function of *dffitool* from theoretical data. The value of the estimator or contrast variable of the test ( $D$ ) corresponds to the maximum value of the absolute difference from CPO and CPE.  $D$  is compared with the value of the contrast variable ( $D_{\alpha}$ ), and it is determined, by means of Equation (2), whether the null hypothesis is accepted or rejected.

$$\begin{cases} \text{if } D \leq D_{0,05} & \rightarrow \text{Accept } H_0 \\ \text{if } D > D_{0,05} & \rightarrow \text{Reject } H_0 \end{cases} \quad (2)$$

The value of the  $D$  estimator from the K-S test, besides determining whether to accept or reject the hypothesis, is also used as a PDF selection criterion. The PDF parameters of the data analyzed are calculated by using maximum likelihood estimators (MLE) [34].

### 3. Results and discussion

On carrying out the traffic analysis, for a particular scenario, the response of the proposed analyzer provides organized information on the difference between arrival times, slice size for video, and audio types I and P. Subsequently, the histogram is generated from the *dffitool*, and the null hypothesis ( $H_0$ ) is checked. Fig. 9 shows the histogram of the slices of the time difference of the P frames and the PDFs of the possible null hypotheses ( $H_0$ ) to be validated with the K-S goodness-of-fit test. Fig. 10 shows the CPO of the time difference slices and the CPE of the different null hypotheses to be validated.

Table IV shows the calculated values of the test statistic ( $D$ ) and their comparison with the contrast value ( $D_{0,05}$ ) for the possible null hypotheses shown in Fig. 9 and 10. By analyzing this information, it is obtained that only the null hypothesis, which states that the analyzed data fit an 'Inverse Gaussian' PDF is valid. The parameters for the PDF found are shown in Fig. 11, where the type of distribution, the mean, and the variance calculated with the maximum likelihood estimator are presented. Additionally, the parameters that define the distribution are shown along with their statistical error.

Tables V and VI present the results obtained from the PDF that describe the behavior of each type of frame, video, and audio for the size and relative time between slices of the four video categories (interview: category A; cartoons: categories B and D; football match: category C; and movie: category E) used in all the test environments already described in the methodology. Moreover, the  $D$  estimator is shown for the K-S test, and it is lower than the contrast variable ( $D_{0,05}$ ) for all cases,

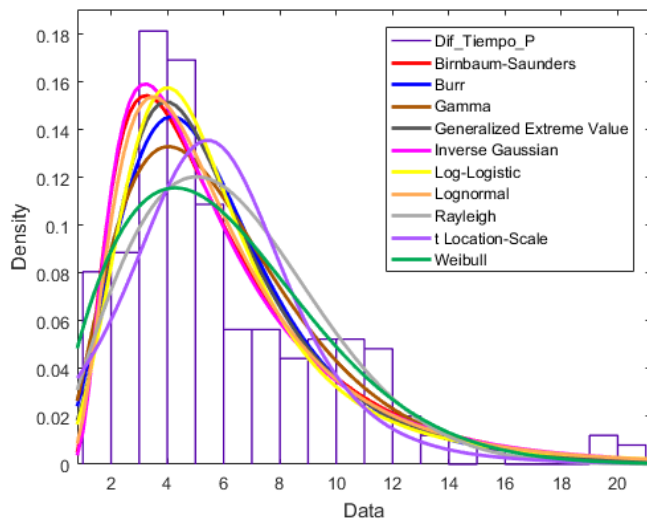


Figure 9. Histogram of time difference of  $P$  slices and the PDFs of the possible  $H_0$

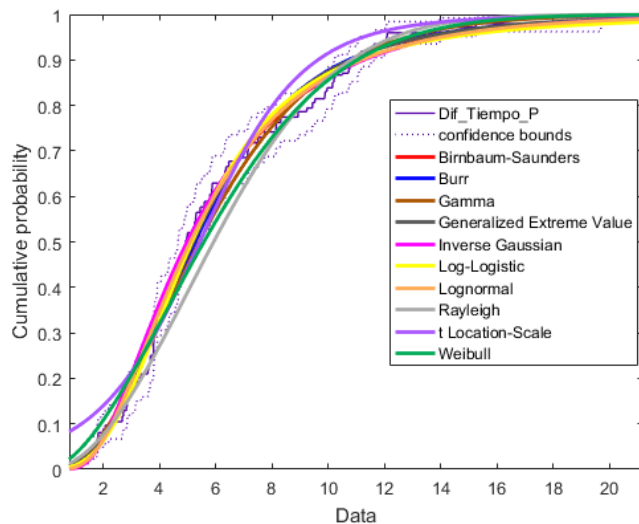


Figure 10. POA of slices of time difference and the probability expected cumulative (PEA) of the  $H_0$

where  $D_{0,05}$  shows values between 0,2104 and 0,163, which correspond to the amount of samples used. All scenarios used between 60 and 100 samples. Due to the profile of the encoder used, the Baseline Profile ( $BP$ ) of the H.264/MPEG-4 AVC only detects type I and P video slices. Table VII shows the PDF used and the parameters that define it.



**Table IV.** Results of the K-S test for different proposed null hypotheses

PDF Null Hypothesis H 0	Contrast value D 0,05	Statistical value D	Result
Birnbaum-Saunders	0,0775	0,0799	Hypothesis rejected
Burr	0,0775	0,1073	Hypothesis rejected
Gamma	0,0775	0,112	Hypothesis rejected
Generalized Extreme Value	0,0775	0,1015	Hypothesis rejected
Inverse Gaussian	0,0775	0,0623	Hypothesis accepted
Log-Logistic	0,0775	0,1004	Hypothesis rejected
Lognormal	0,0775	0,0799	Hypothesis rejected
Rayleigh	0,0775	0,1613	Hypothesis rejected
t Location-Scale	0,0775	0,1164	Hypothesis rejected
Weibull	0,0775	0,1123	Hypothesis rejected

```

Results:
Distribution:      Inverse Gaussian
Log likelihood:  -636.095
Domain:          0 < y < Inf
Mean:            6.08484
Variance:        16.8464

Parameter  Estimate  Std. Err.
mu         6.08484  0.260632
lambda    13.3733  1.20096
    
```

**Figure 11.** Parameters of the Inverse Gaussian distribution function obtained with *dffitool*

The following explains a particular case, which is highlighted in Tables IV and V, where a UE reproduces a C category live video (football match), and the user moves away from the eNB at an average rate of 3 mps (7,2 km/h).

In accordance with the results shown for the sizes and arrival times of slices in Tables IV and V, the type of traffic characterized by this scenario can be modelled by the following PDF:

- The sizes of type I slices are described through a PDF Extreme Value with  $\mu = 156931$  and  $\sigma = 13736$ . Through the K-S test, it is possible to obtain a D estimator = 0,1405, which is lower than the contrast variable ( $D_{0,05} = 0,1948$ ), which corresponds to  $N = 70$  samples (see Equation (1)).
- The sizes of type P slices are described through a Weibull-type PDF  $\alpha = 102749$  and  $b = 6,555$ . Through the K-S test, it is possible to obtain a D estimator = 0,0781, which is lower than the contrast variable with a 0,05 significance level ( $D_{0,05} = 0,2104$ ) for  $N = 60$  samples.
- The sizes of the audio slices are described through a tLocationScale-type PDF with  $\alpha = 1549,17$ ,  $\sigma = 34,56$ , and  $v = 1,716$ . Through the K-S test, it is possible to obtain a D estimator = 0,0243, which is lower than the contrast variable with a 0,05 significance level 0,05 ( $D_{0,05} = 0,1934$ ) for  $N = 71$  samples.

**Table V.** PDF for the slice size from different categories and test scenarios

Esc.	Video cat.	PDF I	PDF P	Audio PDF
1	A	logLpdf(x,6,61739, 0,00329778)	wblpdf(x, 174806, 5,05487)	logpdf(x, 81669,5, 10730,6)
		D= 0,1697, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D= 0,0682, D <sub>0,05</sub> =0,1948	D = 0,0733, D <sub>0,05</sub> =0,1948
	B and D	tlspdf(x, 289580, 14004,1, 2,10368)	normpdf(x, 180567, 43370,1)	evpdf(x, 1662,36, 149,224)
		D = 0,1754, D <sub>0,05</sub> =0,2070	D= 0,0789, D <sub>0,05</sub> =0,18	D = 0,02259, D <sub>0,05</sub> =0,1789
	C	evpdf(x, 164886, 17471,6)	wblpdf(x, 109828, 6,54957)	sblpdf(x, 0,660443, 0,367676, 64,5148, 1547,7);
		D = 0,1355, D <sub>0,05</sub> =0,22053	D = 0,0884, D <sub>0,05</sub> =0,1743	D = 0,01817, D <sub>0,05</sub> =0,1781
		normpdf(x, 94504,1, 17939,1)	gevpdf(x, 0,549922, 5068,72, 136880)	logpdf(x, 1580,03, 85,7946)
E	D = 0,0436, D <sub>0,05</sub> =0,2037	D = 0,2092, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,02146, D <sub>0,05</sub> =0,1727	
2	A	logpdf(x, 747,977, 2,49471)	logpdf(x, 156675, 21441,5)	gevpdf(x, -0,394584, 195,314, 1534,98)
		D= 0,1723, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,0774, D <sub>0,05</sub> =0,1822	D = 0,02544, D <sub>0,05</sub> =0,1727
	B and D	nakpdf(x, 18,9699, 9,40673)	ricpdf(x, 180069, 38366,8)	logpdf(x, 1573,24, 83,5492)
		D = 0,2045, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,0573, D <sub>0,05</sub> =0,1718	D = 0,01717, D <sub>0,05</sub> =0,1638
	C	evpdf(x, 101217, 65510,5)	bspdf(x, 99134,9, 0,175149)	tlspdf(x, 1548,31, 41,4081, 1,38915)
		D = 0,1251, D <sub>0,05</sub> =0,1948	D = 0,0751, D <sub>0,05</sub> =0,1737	D = 0,01656, D <sub>0,05</sub> =0,1708
E	nakpdf(x, 7,79266, 102403)	gevpdf(x, -0,226822, 6219,98, 144528),	logpdf(x, 1583,14, 92,3756 )	
	D = 0,0612, D <sub>0,05</sub> =0,1991	D = 0,2085, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,02390, D <sub>0,05</sub> =0,1708	
3	A	wblpdf(x, 749,614, 1276,56)	evpdf(x, 178374, 38897,7)	ricpdf(1585,31, 176,483)
		D = 0,2072, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,0661, D <sub>0,05</sub> =0,1869	D = 0,02357, D <sub>0,05</sub> =0,1833
	B and D	igpdf(x, 302550, 3,12167)	igpdf(x, 189547, 3,76263)	logpdf(x, 1569,12, 78,5542)
		D = 0,1535, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,0731, D <sub>0,05</sub> =0,1948	D = 0,02314, D <sub>0,05</sub> =0,1663
	C	evpdf(x, 156931, 13736)	wblpdf(x, 102749, 6,55645)	tlspdf(x, 1549,17, 34,561, 1,7167)
		D = 0,1405, D <sub>0,05</sub> =0,1948	D = 0,0781, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,02436, D <sub>0,05</sub> =0,1934
E	gevpdf(x, -0,582838, 22267,5, 92197,7)	evpdf(x, 153810, 6038,86)	logpdf(x, 1581,57, 91,8112)	
	D = 0,0209, D <sub>0,05</sub> =0,1976	D = 0,2057, D <sub>0,05</sub> =0,2070	D = 0,1735, D <sub>0,05</sub> =0,1948	
4	A	wblpdf(x, 749,52, 1098,41)	logpdf(x, 150553, 19685,1)	ricpdf(1586,53, 170,343)
		D = 0,1970, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,0634, D <sub>0,05</sub> =0,1869	D = 0,02338, D <sub>0,05</sub> =0,1920
	B and D	nakpdf(x, 136,718, 8,04495)	evpdf(x, 208111, 34260,3)	wblpdf(x, 1640,76, 10,4471)
		D = 0,1978, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,0746, D <sub>0,05</sub> =0,1845	D = 0,02136, D <sub>0,05</sub> =0,1811
	C	logpdf(x, 52398,5, 36906)	bspdf(x, 94934,9, 0,180549)	tlspdf(x, 1553,72, 33,8986, 1,48929)
		D = 0,1150, D <sub>0,05</sub> =0,1962	D = 0,0741, D <sub>0,05</sub> =0,1767	D = 0,09316, D <sub>0,05</sub> =0,1727
E	lognpdf(x, 11,489, 0,182723)	wblpdf(x, 136581, 44,5408)	logpdf(x, 1577,88, 90,6407)	
	D = 0,0555, D <sub>0,05</sub> =0,2037	D = 0,2093, D <sub>0,05</sub> =0,2104	D = 0,02418, D <sub>0,05</sub> =0,1811	
5	A	wblpdf(x, 749,638, 1200,59)	evpdf(x, 177815, 42231,3)	ricpdf(x, 1589,22, 175,14)
		D = 0,1928, D <sub>0,05</sub> =0,2070	D = 0,0650, D <sub>0,05</sub> =0,1867	D = 0,02345, D <sub>0,05</sub> =0,1708
	B and D	evpdf(x, 289061, 11910,9)	gevpdf(x, -0,466414, 42209,4, 179640)	logpdf(x, 1574,92, 82,6043)
		D = 0,1715, D <sub>0,05</sub> =0,1822	D = 0,0718, D <sub>0,05</sub> =0,1699	D = 0,01689, D <sub>0,05</sub> =0,163
	C	evpdf(x, 161471, 15329,2)	bspdf(x, 97137,1, 0,18759)	tlspdf(x, 1542,92, 44,6058, 1,2018)
		D = 0,1290, D <sub>0,05</sub> =0,1822	D = 0,0835, D <sub>0,05</sub> =0,1789	D = 0,02326, D <sub>0,05</sub> =0,1718
E	gampdf(x, 28,9585, 3472,41)	gevpdf(x,0,205751, 1716,02, 133083)	tlspdf(x, 1539,41, 52,6267, 1,03931)	
	D = 0,0703, D <sub>0,05</sub> =0,1833	D = 0,1543, D <sub>0,05</sub> =0,1690	D = 0,02273, D <sub>0,05</sub> =0,1869	

**Table VI.** PDF for the relative time between slices from different categories and test scenarios

Esc.	Video cat.	PDF I	PDF P	Audio PDF	
1	A	normpdf(x, 3.04151, 0.579948)	evpdf(x, 0.575861, 0.32636)	normpdf(x, 4.98928e-05, 2.04313e-05)	
		D = 0,0760, D <sub>0,05</sub> =0,1976	D = 0,1204, D <sub>0,05</sub> =0,1845	D = 0,0226, D <sub>0,05</sub> =0,2053	
	B and D	ricpdf(x, 2.98132, 0.598063)	evpdf(x, 0.597608, 0.313581)	gevpdf(x, -0.0874135, 2.3439e-05, 4.0658e-05),	
		D = 0,0748, D <sub>0,05</sub> =0,2053	D = 0,1223, D <sub>0,05</sub> =0,1857	D = 0,02245, D <sub>0,05</sub> =0,1786	
			ricpdf(x, 2.94971, 0.58046)	evpdf(x, 0.570071, 0.363482)	logpdf(x, 5.29828e-05, 1.24337e-05)
	C	D = 0,1330, D <sub>0,05</sub> =0,1948	D = 0,1309, D <sub>0,05</sub> =0,1737	D = 0,02106, D <sub>0,05</sub> =0,1778	
E	ricpdf(x, 3.01304, 0.603692)	evpdf(x, 0.573382, 0.306633)	sblpdf(x, 1.18627, -0.422653, 8.01472e-06, 5.723e-05),		
	D = 0,0750, D <sub>0,05</sub> =0,1991	D = 0,1304, D <sub>0,05</sub> =0,1845	D = 0,0218, D <sub>0,05</sub> =0,174		
2	A	normpdf(x, 3.02754, 0.573583)	logpdf(x, 0.463678, 0.201116)	logpdf(x, 5.37621e-05, 1.04931e-05)	
		D = 0,0718, D <sub>0,05</sub> =0,1948	D = 0,0756, D <sub>0,05</sub> =0,1822	D = 0,02441, D <sub>0,05</sub> =0,1681	
		logpdf(x, 2.94899, 0.377475)	evpdf(x, 0.580057, 0.291987)	ricpdf(x, 4.50961e-05, 2.01485e-05)	
	B and D	D = 0,07566, D <sub>0,05</sub> =0,1991	D = 0,1216, D <sub>0,05</sub> =0,1789	D = 0,01199, D <sub>0,05</sub> =0,1757	
		normpdf(x, 3.03274, 0.560896)	evpdf(x, 0.0256111, 0.0429848)	sblpdf(x, 1.10562, -0.374936, 7.45368e-06, 5.679e-05),	
	C	D = 0,1311, D <sub>0,05</sub> =0,2053	D = 0,02061, D <sub>0,05</sub> =0,1690	D = 0,0263, D <sub>0,05</sub> =0,178	
E	ricpdf(x, 3.01304, 0.603692)	evpdf(x, 0.453385, 0.363379)	logpdf(x, 5.43433e-05, 1.06324e-05)		
	D = 0,1210, D <sub>0,05</sub> =0,1976	D = 0,1521, D <sub>0,05</sub> =0,1621	D = 0,02412, D <sub>0,05</sub> =0,1811		
3	A	ricpdf(x, 2.97072, 0.578128)	evpdf(x, 0.634157, 0.310141)	sblpdf(x, 1.21001, -0.460126, 8.67883e-06, 5.675e-05),	
		D = 0,0718, D <sub>0,05</sub> =0,1976	D = 0,1308, D <sub>0,05</sub> =0,1718	D = 0,0239, D <sub>0,05</sub> =0,1962	
		normpdf(x, 3.06832, 0.54597)	evpdf(x, 0.599063, 0.327254)	sblpdf(x, 1.14607, -0.452062, 9.96966e-06, 5.383e-05),	
	B and D	D = 0,0802, D <sub>0,05</sub> =0,1934	D = 0,1223, D <sub>0,05</sub> =0,1811	D = 0,0165, D <sub>0,05</sub> =0,176	
		ricpdf(x, 2.8844, 0.604877)	evpdf(x, 0.45935, 0.313379)	sblpdf(x, 0.917028, -0.198, 6.99932e-06, 5.45e-05)	
	C	D = 0,0718, D <sub>0,05</sub> =0,1948	D = 0,1340, D <sub>0,05</sub> =0,2021	D = 0,02437, D <sub>0,05</sub> =0,1767	
E	ricpdf(x, 2.91076, 0.606291)	evpdf(x, 0.453385, 0.363379)	wblpdf(x, 5.66215e-05, 2.84341)		
	D = 0,0718, D <sub>0,05</sub> =0,12021	D = 0,1521, D <sub>0,05</sub> =0,1882	D = 0,02590, D <sub>0,05</sub> =0,1907		
4	A	ricpdf(3.05515, 0.543689)	evpdf(x, 0.646653, 0.332341)	logpdf(x, 5.36445e-05, 1.10432e-05)	
		D = 0,0750, D <sub>0,05</sub> =0,2087	D = 0,1152, D <sub>0,05</sub> =0,1778	D = 0,02264, D <sub>0,05</sub> =0,1690	
		normpdf(x, 3.01676, 0.582742)	evpdf(x, 0.57168, 0.295165)	wblpdf(x, 5.79899e-05, 2.21516)	
	B and D	D = 0,0762, D <sub>0,05</sub> =0,1991	D = 0,1323, D <sub>0,05</sub> =0,1920	D = 0,02337, D <sub>0,05</sub> =0,1822	
		logpdf(x, 2.94427, 0.365664)	evpdf(x, 0.467442, 0.352899)	evpdf(x, 6.59684e-05, 3.56448e-05)	
	C	D = 0,0721, D <sub>0,05</sub> =0,2037	D = 0,1493, D <sub>0,05</sub> =0,1869	D = 0,09331, D <sub>0,05</sub> =0,1655	
E	ricpdf(x, 3.01699, 0.559062)	evpdf(x, 0.395388, 0.313032)	normpdf(x, 5.22776e-05, 2.031e-05)		
	D = 0,1468, D <sub>0,05</sub> =0,1991	D = 0,1860, D <sub>0,05</sub> =0,2006	D = 0,02512, D <sub>0,05</sub> =0,1699		
5	A	ricpdf(3.01304, 0.603692)	evpdf(x, 0.573382, 0.306633)	ricpdf(x, 4.60229e-05, 2.20583e-05)	
		D = 0,0751, D <sub>0,05</sub> =0,2037	D = 0,1294, D <sub>0,05</sub> =0,1767	D = 0,02408, D <sub>0,05</sub> =0,1655	
		ricpdf(x, 2.92523, 0.581191)	logpdf(x, 0.418901, 0.216675)	logpdf(x, 5.27064e-05, 1.09349e-05)	
	B and D	D = 0,1329, D <sub>0,05</sub> =0,2021	D = 0,1330, D <sub>0,05</sub> =0,1767	D = 0,02406, D <sub>0,05</sub> =0,1690	
		logpdf(x, 2.94427, 0.365664)	evpdf(x, 0.467442, 0.352899)	logpdf(x, 5.40897e-05, 1.08668e-05)	
	C	D = 0,0716, D <sub>0,05</sub> =0,2006	D = 0,0723, D <sub>0,05</sub> =0,1811	D = 0,02068, D <sub>0,05</sub> =0,1681	
E	normpdf(x, 3.00284, 0.565114)	evpdf(x, 0.344883, 0.27107)	sblpdf(x, 1.187, -0.373033, 8.51082e-06, 5.694e-05),		
	D = 0,0714, D <sub>0,05</sub> =0,2070	D = 0,1714, D <sub>0,05</sub> =0,1681	D = 0,0232, D <sub>0,05</sub> =0,165		

Table VII. PDF and parameters

Name	Input parameters		Representation	
<i>BIRNBAUMSAUNDERS</i>	$\beta$ : scale	$\gamma$ : shape	$\text{bspdf}(x, \beta, \gamma)$	
<i>EXTREME VALUE</i>	$\mu$ : location r	$\sigma$ : scale r	$\text{evpdf}(x, \mu, \sigma)$	
<i>GAMMA</i>	a: shape	b: scale	$\text{gampdf}(x, a, b)$	
<i>GENERALIZED EXTREME VALUE</i>	k: shape	$\sigma$ : scale	$\mu$ : location	$\text{gevpdf}(x, k, \sigma, \mu)$
<i>HALFNORMAL</i>	$\mu$ : location	$\sigma$ : scale	$\text{hnpdf}(x, \mu, \sigma)$	
<i>INVERSEGAUSSIAN</i>	$\mu$ : scale	$\lambda$ : shape	$\text{igpdf}(x, \mu, \lambda)$	
<i>LOGISTIC</i>	$\mu$ : mean	$\sigma$ : scale	$\text{logpdf}(x, \mu, \sigma)$	
<i>LOGLOGISTIC</i>	$\mu$ : log mean	$\sigma$ : log scale	$\text{logLpdf}(x, \mu, \sigma)$	
<i>LOGNORMAL</i>	$\mu$ : log mean	$\sigma$ : log standard deviation	$\text{lognpdf}(x, \mu, \sigma)$	
<i>NAKAGAMI</i>	$\mu$ : shape	$\omega$ : scale	$\text{nakpdf}(x, \mu, \omega)$	
<i>NORMAL</i>	$\mu$ : mean	$\sigma$ : standard deviation	$\text{normpdf}(x, \mu, \sigma)$	
<i>RICIAN</i>	s: noncentrality	$\sigma$ : scale	$\text{ricpdf}(s, \sigma)$	
<i>TLOCATIONSSCALE</i>	$\mu$ : location	$\sigma$ : scale p	v: shape	$\text{tlspdf}(x, \mu, \sigma, v)$
<i>UNIFORM</i>	a: lower end-point	b: upper end-point	$\text{unifpdf}(x, a, b)$	
<i>DISCRETE UNIFORM</i>	n: maximum observable value	$\text{unidpdf}(x, n)$		
<i>WEIBULL</i>	a: scale	b: shape	$\text{wblpdf}(x, a, b)$	

- The arrival times within type I slices are described through a Rician PDF with  $s = 2,884$  and  $\sigma = 0,60487$ . Through the K-S test, it is possible to obtain a D estimator = 0,0718, which is lower than the contrast variable ( $D_{0,05} = 0,1948$ ), which corresponds to  $N = 70$  samples.
- The arrival times within type P slices are described through an Extreme Value PDF with  $\mu = 0,45935$  and  $\sigma = 0,31337$ . Through the K-S test, it is possible to obtain a D estimator = 0,1340, which is lower than the contrast variable ( $D_{0,05} = 0,2021$ ), which corresponds to  $N = 65$  samples.
- The arrival times within the audio slices are described through an Extreme Value PDF with  $\mu = 0,45935$  and  $\sigma = 0,31337$ . Through the K-S test, it is possible to obtain a D estimator = 0,1340, which is lower than the contrast variable ( $D_{0,05} = 0,1948$ ), which corresponds to  $N = 85$  samples.

It can be evidenced, for all scenarios presented in Tables V and VI, that the value of the D estimator from the K-S test is lower than the contrast variable ( $D_{0,05}$ ), which validates all the proposed hypotheses.

## 4. Conclusions

According to the results and for the conditions pre-established in the different experimental scenarios, in order to implement LVS services in an LTE network, the following observations can be made:

- i) Statistical traffic modeling is presented for the audio and video components that constitute the LVS service of an emulated LTE network. The model is developed from real traffic traces.
- ii) It is observed that the traffic modeling of the LVS service shows a very particular description for each of the test scenarios defined. It can be stated that the model found depends on the conditions of each scenario and that there is no single model to describe the general traffic behavior of LVS services in emulated LTE networks. This represents a significant contribution since, for the design and planning of the networks by the operators, it is necessary to characterize the different operating environments in which the end users are normally found. The traffic models that must be taken into account in order to correctly dimension the network depend on this characterization.
- iii) From the traffic models found for each emulated scenario, it is possible to use the defined PDFs to generate traffic in simulation systems that lead to validating other parameters for this type of networks, such as the number of users, interference study, the performance of resource planners, power management, among others, since it is based on a validated model with a behavior that is statistically equivalent to a real system.
- iv) The studies presented in this work are a tool that will allow network designers and planners to have more inputs for a performance analysis focused on QoS parameters from which decisions can be made on resizing the resources assigned to current LTE networks. This ensures that end users of the service obtain a higher degree of satisfaction.

## 5. Acknowledgments

Very special thanks to the Research Group in Telematics Engineering (GIT) at Universidad Politécnica de Cartagena, Spain, where it was possible to implement the emulation scenario that serves as starting point to conduct this research.

## References

- [1] "Ericsson Mobility Report June 2021 – Ericsson," Ericsson, Jul. 14, 2021. <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2021> (accessed Oct. 23, 2021). ↑382
- [2] "3GPP TR 21.915 – Release description; Release 15," iTecTec. <https://itectec.com/archive/3gpp-specification-tr-21-915/> (accessed Dec. 15, 2020). ↑382, 383
- [3] J. Heidemann, K. Obraczka, and J. Touch, "Modeling the performance of HTTP over several transport protocols," *IEEE/ACM Trans. Net. (TON)*, vol. 5, no. 5, pp. 616-630, Jan. 1997. <https://doi.org/10.1109/90.649564> ↑383
- [4] Jbocharov, "Smooth Streaming Transport Protocol," 2008. <https://docs.microsoft.com/en-us/iis/media/smooth-streaming/smooth-streaming-transport-protocol> (accessed Jun. 03, 2020). ↑383
- [5] Apple, "HTTP Live Streaming (HLS) - Apple Developer," 2014. <https://developer.apple.com/streaming/> (accessed Jun. 03, 2018). ↑383
- [6] Adobe, "Adobe HTTP Dynamic Streaming (HDS) Technology Center | Adobe Developer Connection," 2014. <https://www.adobe.com/devnet/hds.html?origref=https%3A%2F%2Fwww.google.es%2F> (accessed Jun. 03, 2020). ↑383
- [7] ISO/IEC, "MPEG Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (MPEG-DASH)," 2010. <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-dash> (accessed Jun. 03, 2018). ↑383

- [8] S. Fowler, J. Sarfraz, M. M. Abbas, E. Bergfeldt, and V. Angelakis, "Evaluation and prospects from a measurement campaign on real multimedia traffic in LTE vs. UMTS," in 2014 4th Int. Conf. Wireless Comm., Vehic. Tech., Info. Theory Aerosp. & Elec. Sys. (VITAE), Aalborg, May 2014. <https://doi.org/10.1109/VITAE.2014.6934475> ↑383
- [9] P. Yin, A. Criminisi, J. Winn, and I. A. Essa, "Bilayer Segmentation of Webcam Videos Using Tree-Based Classifiers," *IEEE Tran. Pat. Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 1, pp. 30-42, Jan. 2011. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.65> ↑383
- [10] W. Y. Campo, H.-F. Bermúdez, and E. Astaiza, "Characterization of traffic of the video streaming service based on lexical analyzers," *Ingeniare. Rev. ch. ing.*, vol. 26, no. 3, pp. 448-458, Sep. 2018. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052018000300448> ↑384
- [11] W. Y. Campo, J. L. Arciniegas, R. García, and D. Melendi, "Análisis de Tráfico para un Servicio de Vídeo bajo Demanda sobre Recles HFC usando el Protocolo RTMP," *Info. tecnol.*, vol. 21, no. 6, pp. 37-48, 2010. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642010000600006> ↑384
- [12] E. V. Berrío and R. C. H. Reyes, "Asignación Equitativa De Capacidad Para Tráfico Unicast-Multicast En Redes IPTV Con Almacenamiento Distribuido De Contenidos," *Rev. Telec. Infor.*, vol. 1, no. 1, Jul. 2011. <https://revistas.upb.edu.co/index.php/telecomunicaciones/article/view/1248> ↑384
- [13] W. Y. Campo, "Modelo de Tráfico para Servicios Interactivos de una Comunidad Académica Virtual, con contenidos de Audio y Video de Alta Calidad," Doctoral Thesis, Univ. del Cauca, Popayán, Colombia, 2014. ↑384
- [14] A. Reaz, D. Murayama, K. Suzuki, N. Yoshimoto, G. Kramer, and B. Mukherjee, "Synthetic traffic generation for streaming video to model IPTV," in 2011 Fifth IEEE Int. Conf. Ad. Telecom. Sys. Net. (ANTS), Bangalore, India, Dec. 2011. <https://doi.org/10.1109/ANTS.2011.6163638> ↑384
- [15] B. Villanueva Ocampo, D. López Sarmiento, and E. Rivas Trujillo, "Métodos de modelamiento y predicción de tráfico orientados a plataformas de transmisión de video e IPTV usando series de tiempo," *Rev. cien.*, no. 16, pp. 10-21, 2012. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/article/view/4019/6026> ↑384
- [16] S. Tanwir and H. Perros, "Modeling live adaptive streaming over HTTP," *Comp. Comm.*, vol. 85, pp. 74-88, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.03.025> ↑384
- [17] "H.264 : Advanced video coding for generic audiovisual services. Serie H: Audio Audiovisual And Multimedia Systems; Infrastructure of audiovisual services – Coding of moving video." <https://www.itu.int/rec/T-REC-H.264-201003-S> (accessed Mar. 18, 2020). ↑384, 389
- [18] F. Abdurrahman *et al.*, "Real Time Video Streaming over NS3 based Emulated LTE Networks," *International Journal of Electronics Communication and Computer Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 659-663, May 2014. ↑385, 387
- [19] H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J. L. Arciniegas, W. Y. Campo, and M.-D. Cano, "Performance validation of NS3-LTE emulation for live video streaming under QoS parameters," in 2017 IEEE 13th Int. Conf. Wireless Mob. Comp. Net. Comm. (WiMob), Rome, Italy, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2017.8115836> ↑385
- [20] H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J. L. Arciniegas, W. Y. Campo, and M.-D. Cano, "Statistical validation of an LTE emulation tool using live video streaming over reliable transport protocols," *Telecomm. Sys.*, vol. 71, pp. 491-504, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11235-018-0521-6> ↑385
- [21] ITU-T, "P.910: Subjective video quality assessment methods for multimedia applications," Apr. 1999. <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.910-200804-I/en> (accessed Apr. 12, 2020). ↑385
- [22] "Wireshark," 2018. <https://www.wireshark.org/> (accessed Mar. 05, 2020). ↑385, 386
- [23] "Wowza," 2018. <https://www.wowza.com/products/streaming-engine> (accessed Feb. 08, 2020). ↑386
- [24] "The Apache HTTP Server Project." [http://httpd.apache.org/ABOUT\\_APACHE.html](http://httpd.apache.org/ABOUT_APACHE.html) (accessed Apr. 04, 2018). ↑386
- [25] "LENA," 2019. <http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/> (accessed Jun. 27, 2020). ↑387
- [26] "H.264 : Advanced video coding for generic audiovisual services." <https://www.itu.int/rec/T-REC-H.264-201704-I/en> (accessed Mar. 13, 2020). ↑387
- [27] International Standard ISO/IEC 13818-1, *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems*, ISO, Dec. 01, 2000. ↑389
- [28] Y.-K. Wang, R. Even, T. Kristensen, and R. Jesup, "RFC 6184: RTP Payload Format for H.264 Video," RFC Editor, 2011. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6184> (accessed Mar. 18, 2019). ↑389

- [29] P. J. Leach, T. Berners-Lee, J. C. Mogul, L. Masinter, R. T. Fielding, and J. Gettys, "Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1." <https://tools.ietf.org/html/rfc2616#section-14.17> (accessed Mar. 18, 2020). ↑389
- [30] "Open Distribution Fitter app - MATLAB dfittool" Mathworks. <https://es.mathworks.com/help/stats/dfittool.html> (accessed Jun. 18, 2018). ↑390
- [31] "R: The R Project for Statistical Computing." <https://www.r-project.org/> (accessed Jun. 18, 2020). ↑390
- [32] A. M. L. Porras, *Diseño estadístico de experimentos, análisis de la varianza y temas relacionados: tratamiento informático mediante SPSS*, Granada, Spain: Proyecto sur, 2000. ↑391
- [33] "Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit Test." <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35g.htm> (accessed Mar. 22, 2020). ↑391
- [34] V. K. Rohatgi and A. K. M. E. Saleh, *An Introduction to Probability and Statistics*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011. ↑392

---

### Héctor Fabio Bermúdez Orozco

Full professor and researcher at the Electronic Engineering program at Universidad del Quindío, Colombia. From Universidad del Cauca (Colombia), he received the degrees of Electronics and Telecommunication Engineer in 2000, Master's in Electronics and Telecommunications in 2010, and PhD in Telematic Engineering in 2020, where he received a laureate mention for his doctoral research thesis. He made a doctoral research stay at Universidad Politécnica de Cartagena UPCT in Cartagena Murcia (Spain) in 2018. He is a researcher of the Telecommunications Research group (GITUQ) at Universidad del Quindío. Areas of interest: wireless communications, radiant systems and propagation, modeling of traffic of telematic services, Quality of Service (QoS)/Quality of user Experience (QoE).  
e-mail: hfbermudez@uniquindio.edu.co

---

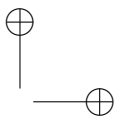
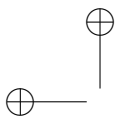
### Wilmar Yesid Campo Muñoz

PhD in Telematic Engineering, master's in engineering (Telematic area), and Engineer in Electronics and Telecommunications from Universidad del Cauca, Colombia. He is a researcher at the GITUQ group of Universidad del Quindío, Colombia, where he is currently working as a professor. His fields of interest are: Software Defined Networking SDN, 5G wireless networks, and teletraffic.  
e-mail: wycampo@uniquindio.edu.co

---

### Evelio Astaiza Hoyos

Electronics Engineer from Universidad del Cauca (1998). Master's in Engineering (Telecommunications area), Universidad del Cauca (2008). PhD in Electronics Science (2017). Full Professor at Universidad del Quindío, Electronic Engineering program. Researcher from the Telecommunications Research group (GITUQ) at Universidad del Quindío.  
e-mail: eastaiza@uniquindio.edu.co



## Case study

# Air Quality Measurement Using an IoT Network: a Case Study

*Medición de la calidad del aire mediante una red IoT: un estudio de caso*

**Hernán Paz Penagos**<sup>1</sup>, **Andrés Moreno Sánchez**<sup>1</sup>, **José Poveda Zafra**<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Colombian School of Engineering Julio Garavito (Bogota-Colombia), <sup>2</sup>GITUD group- Francisco Jose de Caldas District University (Bogota- Colombia). \*Correspondence email: jpoveda@udistrital.edu.co

Recibido: 12/02/2021. Modificado: 03/08/2021. Aceptado: 27/08/2021.

## Abstract

**Context:** The evaluation of air quality in Colombia is localized; it does not go beyond determining whether the level of the polluting gas at a specific point of the monitoring network has exceeded a threshold, according to a norm or standard, in order to trigger an alarm. It is not committed to objectives as important as the real-time identification of the dispersion dynamics of polluting gases in an area, or the prediction of the newly affected population. From this perspective, the presence of polluting gases was evaluated on the university campus of Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, located north of the city of Bogotá, and the affected population was estimated for the month of October, 2019, using the Kriging geostatistical technique.

**Method:** This study is part of the design and construction of an auxiliary mobile station that monitors and reports complementary information (CO and SO<sub>2</sub> gases) to that provided by the Guaymaral meteorological station, located in the north of Bogotá. This information is transmitted through an IoT network to a server, where a database is created which stores the information on polluting gases reported by the 14 stations of the Bogotá air quality monitoring network, the information sent by the auxiliary station, and the statistical information of the population present on the university campus. Pollutant gas data and population information recorded from October 1<sup>st</sup> to 31<sup>st</sup>, 2019, are the input for data analysis using the Kriging interpolation method and predicting the affected population on said campus.

**Results:** There is a particulate matter concentration of 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  of PM10 in the coliseum and 12,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  of PM2,5 in building G, in addition to 9,8 ppb of O<sub>3</sub> in building I, 14,9 ppb of NO<sub>2</sub> in that same building, 0,79 ppb of CO in building C, and 0,65 ppb of SO<sub>2</sub> also in building C, thus allowing to infer, according to the Bogotá air quality index, a favorable air quality for a population of 2.131 people who visited the campus university during the aforementioned period.

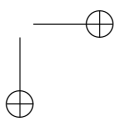
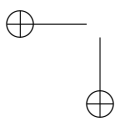
**Conclusions:** The correct integration of the data in the web server and their analysis, carried out in the R language, allowed determining the approximate indicators of the polluting factors around Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Additionally, to determine the affected population, these indicators were correlated with the information on the registered population that entered the campus during the period under study. Based on the results obtained, it was concluded that the air quality on the campus of Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito is favorable, and that 2.131 people benefited daily from these conditions.

**Keywords:** polluting factors, modeling, Kriging method, air quality, area, population

## Open access



Cite this paper as: H. Paz-Penagos, A. A. Moreno-Sánchez, and J. N. Poveza-Zafra, "Air Quality Measurement Using an IoT Network: a Case Study". INGENIERÍA. Vol. 26, Num. 3, 2021. 401:418. © The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://doi.org/10.14483/23448393.17589>





### Resumen

**Contexto:** La evaluación de la calidad del aire en Colombia es localizada; no va más allá de determinar si el nivel del gas contaminante en un punto específico de la red de monitoreo ha excedido un umbral, de acuerdo con una norma o estándar, con el fin de generar una alarma. No se compromete con objetivos tan importantes como identificar en tiempo real la dinámica de dispersión de los gases contaminantes en una zona, ni la predicción de la nueva población afectada. Desde esta perspectiva, se evaluó la presencia de los gases contaminantes en el campus universitario de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ubicada al norte de la ciudad de Bogotá, y se estimó la población afectada para el mes de octubre de 2019 utilizando la técnica geoestadística de Kriging.

**Método:** Este estudio forma parte del diseño y construcción de una estación móvil auxiliar que monitorea y reporta información complementaria (gases CO y SO<sub>2</sub>) a la que brinda la estación meteorológica de Guaymaral, ubicada en el norte de Bogotá. Esta información es transmitida a través de una red IoT hacia un servidor, donde se crea una base de datos que almacena la información de los gases contaminantes reportada por las 14 estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá, la información enviada por la estación auxiliar y la información estadística de la población presente en el campus universitario. Los datos de los gases contaminantes y la información de la población registrada desde el 1 al 31 de octubre de 2019 son el insumo para el análisis de datos mediante el método de interpolación de Kriging y la predicción de la población afectada en dicho campus.

**Resultados:** Se encuentra una concentración de material particulado de 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM10 en el coliseo y 12,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM2,5 en el edificio G. Además de 9,8 ppb de O<sub>3</sub> en el edificio I, 14,9 ppb de NO<sub>2</sub> en ese mismo edificio, 0,79 ppb de CO en el edificio C y 0,65 ppb de SO<sub>2</sub> también en el edificio C, permitiendo inferir, según el índice de calidad del aire de Bogotá, una calidad del aire favorable para una población de 2.131 personas que visitaron el campus universitario durante el período mencionado.

**Conclusiones:** La correcta integración de los datos en el servidor web y el análisis de estos, realizado en lenguaje R, permitieron determinar los indicadores aproximados de los factores contaminantes en el área de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Adicionalmente, para determinar la población afectada, estos indicadores se correlacionaron con la información de la población registrada que ingresó al campus durante el periodo de estudio. Con base en los resultados obtenidos, se pudo concluir que la calidad del aire en el campus universitario de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito es favorable y 2.131 personas se beneficiaron diariamente de estas condiciones.

**Palabras clave:** factores contaminantes, modelación, método de Kriging, calidad del aire, área, población

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

In Colombia, the monitoring and control of atmospheric pollution have become increasingly relevant, given that the indicators of atmospheric pollution have peaked in the main cities due to the growth of the industrial sector, the overexploitation of natural resources (coal, wood, etc.), and the increase in the use of vehicles. However, there is still a lack of awareness of this impact, and the necessary administrative instruments and mechanisms for the prevention and control of environmental deterioration factors have not been defined and regulated. Additionally, the evaluation of air quality is motivated by the need to determine whether a norm or standard has been violated, leaving aside another objective, which is to determine the affected population and the risk to human health that may be caused by exposure to pollutants in the atmosphere.

In this context, the research problem addressed in this paper is the determination of the level of pollution and the affected human population in Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (case study), located in Bogotá, during October 2019. This research was conducted in the campus of the aforementioned educational institution, where the climatological station of Guaymaral operates, which belongs to the Air Quality Monitoring Network of Bogotá (RMCAB). This station detects and reports the values of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> levels to a centralized database. However, it does not report information on the polluting gases CO and SO<sub>2</sub>. To determine the level of pollution by recording the eight polluting gases, as well as the affected population in this area, it was necessary to design and build a mobile station that detects CO and SO<sub>2</sub> with low-cost sensors, which transmits the information through an Internet of Things (IoT) network with LoRa (Long-Range Protocol) devices and LPWAN (Low-Power WAN) technology to a server. The methodological design for recording (measurements of polluting gases: average values, sampling frequencies, etc.), analysis, and interpretation of the data was based on the guidelines of the protocol for monitoring air quality in Colombia [1]. The contributions of this work are: 1) disclosing pollution levels to a population that works and studies in a specific area in order to take measures to reduce exposure or reassure the academic community, 2) provide new comprehensive technical elements to improve air quality management, and 3) present the results obtained and the methodology followed in this case study to the Colombian Ministry of Environment and Sustainable Development, which seeks to design a national air quality modeling guide.

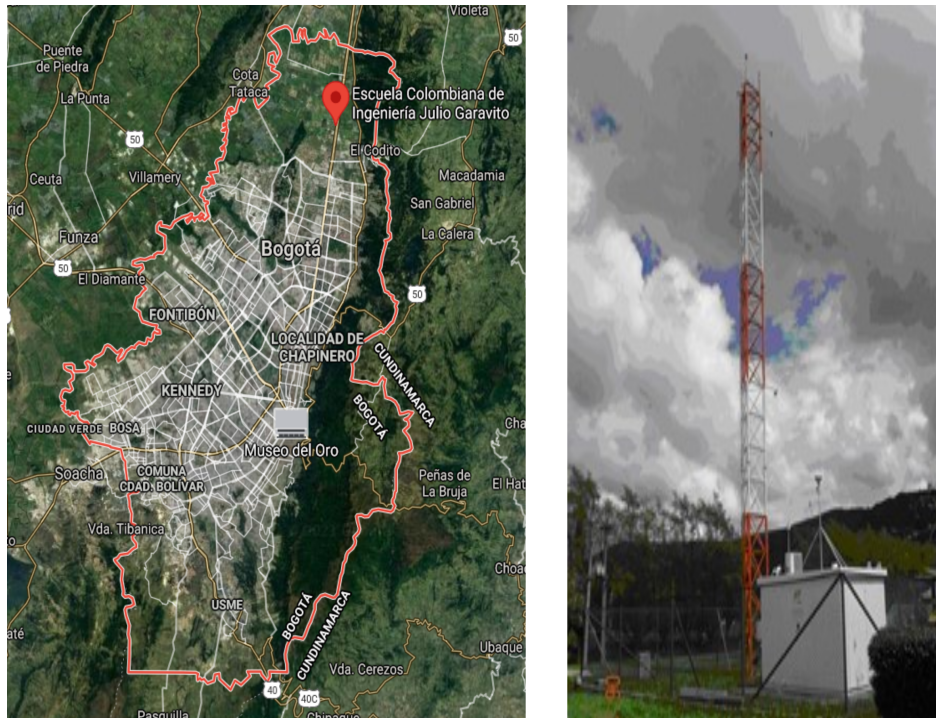
## 2. Theoretical framework

The first works on air quality measurement in Colombia refer to the design of interfaces for the capture of meteorological data and the installation and start-up of this type of station in some cities. At present, the measurements and reporting of the average values of the variables that determine air quality in urban areas, the cut-off points, and the quality index of the network of stations follow the guidelines of the protocol for monitoring air quality [1].

### 2.1. State of the art in the Colombian context

In 2019, the monitoring of atmospheric pollution phenomena in Colombia was carried out with 203 monitoring stations distributed in 83 municipalities and 22 departments. For the case of Bogotá, it was carried out by the District Secretariat of the Environment (SDA) with the RMCAB, which has 14 monitoring stations, out of which 12 are fixed, one is meteorological, and the other one is mobile. This level IV Air Quality Monitoring System (SVCA) is located at strategic sites in the city. The stations have automatic equipment that continuously and permanently monitors concentrations of criteria pollutants, such as particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>) and pollutant gases (O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub>); and meteorological variables such as precipitation, wind speed and direction, temperature, solar radiation, relative humidity, and barometric pressure.

In the above scenario, Guaymaral is a climatological station of the RMCAB [1] that, according to the National Station Catalog (CNE) of the Institute of Hydrology, Meteorology, and Environmental Studies (IDEAM), is located at 4° 47' 1,52" north latitude and 74° 2' 39,06" west longitude, at 2.580 m above sea level in the locality of Suba, northern Bogotá (Fig. 1). This station measures



**Figure 1.** Guaymaral weather station in the locality of Suba, in northern Bogotá, on the campus of the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

**Source:** own elaboration.

common meteorological variables such as air temperature, precipitation, humidity, wind direction and speed, solar radiation and evaporation, and pollutant gases: PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub>. Observations are carried out daily at 7 a.m., 1 p.m., and 7 p.m. Guaymaral does not report any CO or SO<sub>2</sub> data.

## 2.2. State of the art in the international context

In the international context, the literature on this topic reports information on the most common technologies for wireless sensor interconnection and data transmission from the weather station to the monitoring center. In 2016, [2] proposed a multichannel wireless sensor network with the ZigBee protocol at 2.4 GHz. This study examined the interference between ZigBee and WLAN protocols and sought to improve network performance by increasing the packet delivery rate with the use of time-division multiplexing and cluster tree protocols. [3] developed a monitoring system for a vertical axis wind turbine using ZigBee; monitoring was performed using the LR-WPAN standard, which was compatible with the ZigBee protocol. As for data analysis, data were collected through a layered computing system, which facilitated the integration of sensor information and analysis of the captured data. [4] proposed an environmental gas monitoring system using a

sensor array with an SPI output. The research consisted of two parts: a client part and a server part. The latter was written in the C language and had four gas sensors, whereas the client part was programmed as an object in JavaScript, thus facilitating graphical visualization and data analysis. [5] developed a data acquisition system based on the ZigBee and Bluetooth protocols using two Arduino modules: one to read the signals acquired by the sensors and transmit them through the ZigBee module, and the other to retrieve the data. In addition, the Bluetooth module was used to communicate with a smartphone and a computer to visualize the data. [6] designed an automatic irrigation system based on a patented algorithm and powered by solar panels. This system used a duplex wireless network with humidity and temperature sensors located in the soil near the plant roots. As a result of the project, it was possible to reduce water consumption by 90 % over 136 days. [7] developed a wireless data acquisition system based on a PIC16F microcontroller, a RF antenna, rechargeable AA batteries, and photovoltaic panels. The acquired data corresponded to those provided by sensors measuring solar radiation, temperature, relative humidity, pressure, wind speed, and direction. Once the data were acquired, they were modulated and transmitted via RF to a base station, which demodulated the information and sent it through a RS 232 interface to a computer for visualization in LabView. [8] developed a wireless sensor network with Zigbee communication. The interface for data acquisition was built with a microcontroller and an ADC, which communicated with the Zigbee module through a conventional asynchronous serial interface. The data retrieved from the Zigbee receiver were sent to a computer for display on a graphical interface programmed in C#. [9] implemented a monitoring network with LoRa WAN networks to measure PM10 and PM2,5 in the town of Santa Maria Degli Angeli in the municipality of Assis (Italy). For decision making, the multi-criteria AHP technique was used to define the initial positioning of the sensors. As a result, it was found that the largest emitter of pollutants is the industry, followed by urban traffic and domestic heating. [10] used MQ-135 and DHT11 sensors for the detection of CO, CO<sub>2</sub>, alcohol, air temperature, and humidity, and transmission through an IoT network composed of an Arduino UNO and a Raspberry Pi. As a result, a platform for monitoring and issuing early warnings of the monitored air quality was configured. [11] used the MQ-135 sensor, an Arduino UNO, ESP8266 wifi, and GPS modules to measure and report air quality information via IoT networks to Web GIS clients. The goal of the project was to trigger alarms when the set safety limits were exceeded, and action was taken when the authority failed to minimize pollutant levels after a specified period. [12] detected PM10, PM2,5, temperature, and humidity, and they developed a protocol for the transmission of georeferenced data via a LoRaWAN network. [13] measured CO<sub>2</sub> and PM2,5 in the cafeteria kitchen and laboratory room of the Department of Science and Technology of the University of Rwanda. As a result, up to 800 ppm CO<sub>2</sub> and 100 ppm PM2,5 were obtained in the kitchen environment, and 500 ppm CO<sub>2</sub> and 0 ppm PM2,5 in the laboratory, over an observation time of 11 months.

The above allows inferring that most studies revolve around the design and implementation of sensor networks with technologies such as ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth, GPRS, LoRa Wan for environmental monitoring (ESN, Environmental Sensor Networks), and meteorological stations can be located within this category [14]. Although this research designs and builds an auxiliary mobile station (for CO and SO<sub>2</sub> detection), and an IoT network composed of nodes (End-Devices), a gateway, a LoRa to IP protocol conversion module (Backhoul), and a database, its interest is focused on data analytics, real-time identification of the dispersion dynamics of pollutant gases, and determining the affected population in a specific area and time (case study).

### 2.3. IoT (The Internet of Things)

IoT is a line-of-sight, low power consumption wide-area protocol network with a coverage of up to 15 km used in various applications in the 2.4 GHz band (unlicensed Industrial, Scientific, and Medical radio bands, ISM) [15]. The LoRa WAN standard protocol has three layers (physical or transmission layer, MAC medium access layer, and application layer) for the transmitting information at a data rate between 0,3 and 50 Kbps [16], [17].

### 2.4. R studio and Kriging interpolation method:

R is a free programming language and a study environment with a statistical approach and graphic features. Kriging is a geostatistical interpolation procedure that includes autocorrelation, *i.e.*, statistical relationships of the data from the measured points. Because of this, not only can it produce an estimated surface from a set of sparse points with z-values, but it also provides some measure of certainty or accuracy. Kriging assumes that the distance or direction between sample points reflects a spatial correlation, which can be used to explain the variation on the surface [18]. This procedure fits a mathematical function to a specific number of points or all points within a specific radius, in order to determine the output value for each location. This is a multi-step process, which includes exploratory statistical analysis of data, variogram modeling, surface creation, and, optionally, the exploration of a variance surface. Kriging is the most appropriate method when a correlated spatial distance or directional bias is known to exist in the data [19]. It is often used in soil science and geology. However, it shows limitations because it does not consider wind direction and speed, terrain topography, and the existence of buildings in the area. For this reason, it is necessary to have many measurement points to correctly estimate the distribution of pollutant gas in the study area.

## 3. Materials and methods

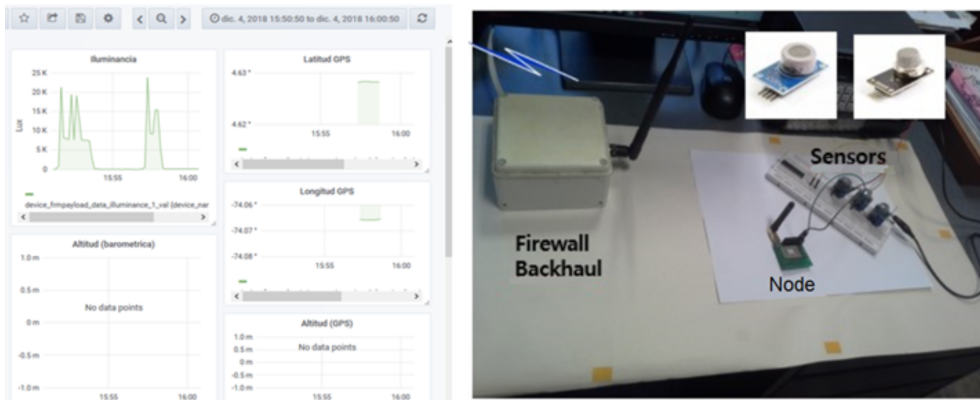
The methodological focus is Top-Down, and the approach of this research, according to [20] p. 120], is classified as qualitative, given that "an attempt is made to explain and predict the phenomena investigated, looking for regularities and causal relationships between elements". Besides, according to the same source, a subcategory of this research can be established as quantitative correlational, since the purpose is "to know the relationship or degree of association that exists between two or more concepts, categories, or variables in a particular context", in the case of this research, the real-time monitoring and evaluation of air quality in an area of Bogotá.

In this context, not all RMCAB weather stations report all the polluting factors (particulate matter, gases, and meteorological variables) that are necessary to assess the pollutant dispersion dynamics, and thus determine the affected areas and population (Table I).

One of the exposed cases is the Guaymaral meteorological station, which lacks the sensors to monitor carbon monoxide (CO) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>). For this reason, an auxiliary station was designed and built for said station, which was installed between September 29<sup>th</sup> and November 1<sup>st</sup>, 2019. It was placed 5 m north of it, and it was interconnected to a server for data transmission over an IoT network. This network was designed and built with a PIC family microchip, as shown in Fig. 2.

**Table I.** Measurement of polluting factors in the weather stations

Weather station	Latitude	Length	Address	PM10	PM2,5	O <sub>3</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>X</sub>	CO	SO <sub>2</sub>
Station created in the investigation	4,78377	-74,04397	Autopista Norte Km. 13	X	X	X	X	X	X	E	E
Guaymaral	4,78375	-74,04416	Autopista Norte Km. 13	E	E	E	E	E	E	X	X
Usaquén	4,71035	-74,03041	Tv. 9 No. 133- 95	E	E	E	X	X	X	E	E
Suba	4,76124	-74,09346	Av. Corpas Km. 13 / Cr. 111 No. 157- 45	E	E	E	X	X	X	X	E
Las Ferias	4,6907	-74,08248	Av. Calle 80 No. 69Q- 50	E	E	E	E	E	E	E	X
CAR	4,65846	-74,08396	Cl. 63 No. 47- 06	E	E	E	E	E	E	E	E
Ministerio de Ambiente	4,62548	-74,06698	Cl. 37 No. 08-40	E	E	E	X	X	X	X	X
Puente Aranda	4,63176	-74,11748	Cr. 65 No. 10- 65	E	X	E	E	E	E	E	E
Kennedy	4,62505	-74,16133	Cr. 86 No. 40- 55 Sur	E	E	E	E	E	E	E	E
Carvajal	4,595616	-74,14858	Autopista Sur No. 61- 40	E	E	E	E	E	E	E	E
Tunal	4,576225	-74,13095	Cr. 24 No. 49- 86 Sur	E	E	E	E	E	E	E	E
San Cristóbal	4,572552	-74,08381	Cr. 2 Este No. 12- 78 Sur	E	X	E	X	X	X	X	X
Fontibón	4,678247	-74,14381	Cr. 96G No. 17B- 49	E	E	E	E	E	E	E	E



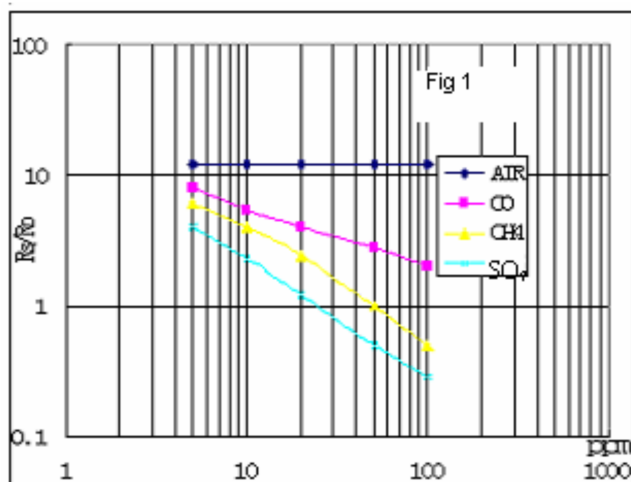
**Figure 2.** Auxiliary station connected to the server through the IoT network

**Source:** own elaboration.

The MQ-136 and MQ-7 sensors were chosen to measure the SO<sub>2</sub> and CO concentration levels. The first of these works with 5 V and has a high SO<sub>2</sub> detection sensitivity (Fig. 3, blue line), between 1 and 100 ppm, with an accuracy of 0,65 % at a temperature of 20 ± 2 °C and relative humidity of 65 ± 5 %. The calibration of this sensor was carried out with calibration gases with a concentration of 10 ppm. Later, these values were compared with those of the RMCAB weather station, where an error of 8,7 % was found. Fig. 3 shows the response curve of the MQ-136 sensor against different gases, where cross-sensitivities to various gases are evident.

On the other hand, the second sensor also works with 5 V and has a detection sensitivity between 20 and 2.000 ppm of CO, with an accuracy of 0,5 % (Fig. 4, violet line). This, at the same tempe-





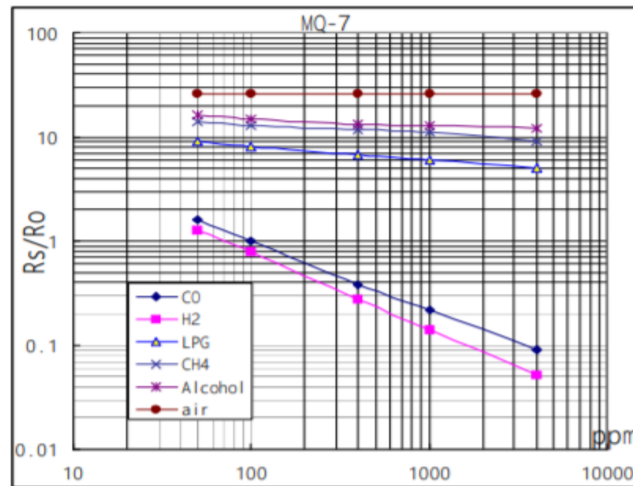
**Figure 3.** Typical sensitivity characteristics of the MQ-136 sensor for various gases at a temperature of 20 °C, relative humidity of 65 %, O<sub>2</sub> concentration of 21 %, RL = 20 kΩ. R<sub>0</sub>: resistance of the sensor to 10 ppm of SO<sub>2</sub> in clean air; R<sub>s</sub>: resistance of the sensor to various concentrations of gases [21]

**Source:** own elaboration.

perature of  $20 \pm 2$  °C and relative humidity of  $65 \pm 5$  %. The calibration of these sensors was carried out as follows: the information provided by the station created in this investigation was compared with that reported by one of the RMCAB meteorological stations (standard sensor). For this, the station created was placed at 3 m from the RMCAB station, and 3 m from the ground for a period of 8 hours. The values obtained were compared with each other: an error of 8,7 % for SO<sub>2</sub> and an error of 3,4 % for CO. These values were used to adjust the test sensor with the value reported by the standard one. Fig. 4 shows the response curve of the MQ-7 sensor against different gases that have a lower R<sub>s</sub>/R<sub>0</sub> ratio, high sensitivity to CO, and a medium sensitivity to H<sub>2</sub>. The MQ-7 allows us to accurately measure CO.

The information acquired by the sensors was sent to the IoT node. This node communicated with the gateway, which was implemented in a Raspberry Pi and programmed in Python to convert the LoRa protocol frames to IP. From the gateway, the information was transmitted to a server through the cloud, which was geographically located within the same city but at another university. The CO and SO<sub>2</sub> data measured by the SDA of the Guaymaral station, as well as that sent by the auxiliary station, were stored in this equipment and visualized through a graphical interface called "Grafana" (Fig. 2).

The transmission of the information was carried out through bidirectional time slots from the application layer, obeying the following steps: the node requests a login (entry) to the network with the configuration data and opens a reception window (listening mode). The gateway receives the request and sends it to the server, which verifies that the node is registered and the encryption key is correct. If the data are correct, it allocates a temporary session and sends it through the gateway



**Figure 4.** Typical sensitivity characteristics of the MQ-7 sensor for various gases at a temperature of 20 °C, relative humidity of 65 %, and O<sub>2</sub> concentration of 21 %, RL = 10 k $\omega$ . R<sub>0</sub>: resistance of the sensor to 100 ppm of SO<sub>2</sub> in clean air; R<sub>s</sub>: resistance of the sensor to various concentrations of gases [22]

**Source:** own elaboration.

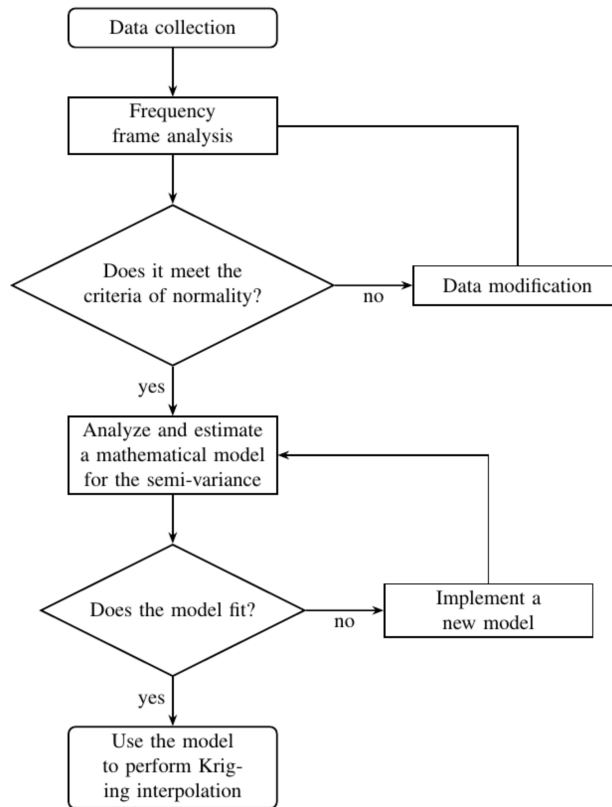
to the node. If they are wrong, it rejects the combination. The node receives the temporary session and can send data to the network according to a defined schedule.

For data analytics, a database was generated on a server for geo-referencing of the Guaymaral station's monitoring point (Geographic Information Systems, GIS, were used). This database stored the information (in HTML format) of the polluting factors that were reported by the Guaymaral climatological station in the period from October 1<sup>st</sup> to 31<sup>st</sup>. Subsequently, the data from the Guaymaral station were compiled and later converted into a tabular format [23]. This information, along with the data received from the auxiliary station, was organized by averaging the data from each sensor in the recorded period, leaving a single geo-referenced value for each gas in each meteorological station, and it was finalized as the input of the data analytics.

The analysis includes data represented in tables and graphs with a comparison of daily hourly averages (every 1,8 and 24 hours, as well as mobile 8-hour averages, as appropriate) and an evaluation with the maximum permissible levels according to the exposure times established in national regulations (Resolution 2.254 of 2017 of the Ministry of Environment and Sustainable Development, MADS). The calculation of each average considers a temporal coverage of at least 75 % of the data.

The spatial distribution of the pollutant concentration measurements is represented by spatial interpolation maps resulting from the implementation of the Kriging geostatistical method, which uses the R Studio software. Therefore, it should be noted that these representations are subject to the presence of uncertainties, which are typical of a procedure that seeks to obtain secondary information based on the measurements of the mobile auxiliary station and each RMCAB station.



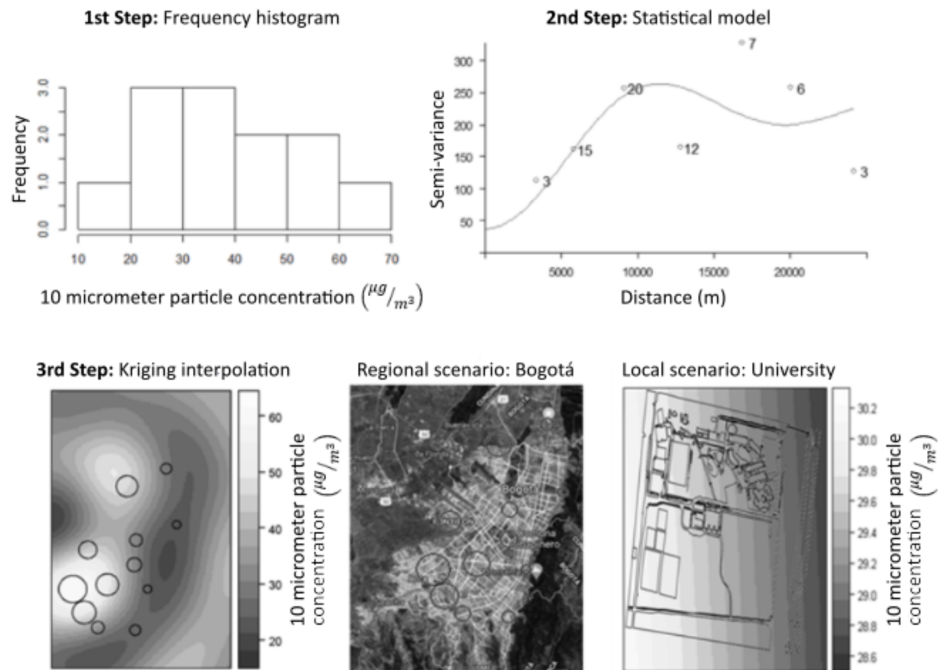


**Figure 5.** Procedure to obtain the statistical prediction model

**Source:** own elaboration.

The procedure is shown in the flow diagram of Figure 5, which consists of selecting the polluting factor, along with its corresponding average value, that is geographically reported by each weather station in the city of Bogotá. These data and the points of the geographical location of the stations are used to construct a frequency histogram, evaluate their normality, and calculate the semi-variance in order to determine the most appropriate statistical model to predict the polluting factor. Finally, the Kriging interpolation is performed, the dispersion dynamics of the pollutant factor in the area is graphically obtained, and the local monitoring area is zoomed (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ECIJG) with a spatial resolution of 10 m. With the above, the indicators of the polluting factors are obtained at a local level.

Fig. 6 shows an example of the steps followed to determine the dispersion of PM10 particulate material and the results obtained. The frequency histogram for PM10 is constructed with the average data that were recorded and reported every 24 hours by the weather stations of Bogotá. The semi-variance graph approximates a statistical model according to the distribution of the data,



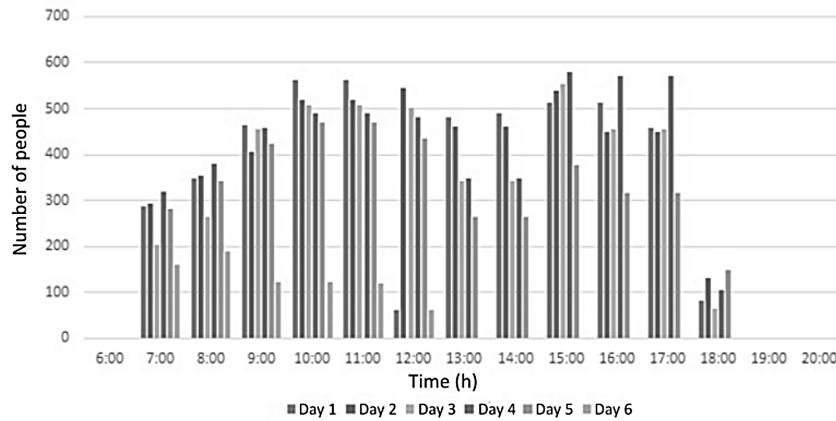
**Figure 6.** Steps followed to determine the presence of PM10 particulate matter in the university

**Source:** own elaboration.

which represent groups of distances existing between the location points of the Bogotá weather stations (discarding extreme distances greater than 30 km and close to 0 m or null distance, in which the particulate material does not show any changes).

Then, the prediction model is adjusted, and the Kriging interpolation is performed, which gives a graph in contour lines of the concentration of PM10 in a domain mesh of the regional model. The concentration isopleths of this particulate material are obtained locally, and the domain mesh is limited with a resolution of 10 m to achieve a spatial zoom.

The procedure was the same for the rest of the polluting factors, namely the concentration of PM2,5 particulate matter and polluting gases SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, and O<sub>3</sub>. The parameterization of the academic and administrative community of ECIJG, which was present in each of the university buildings, was carried out in time slots (according to class changes), for a normal daytime schedule from 7:00 a.m to 7:00 p.m, and for the period from October 1<sup>st</sup> to 31<sup>st</sup>, 2019. The sources of information were the registration and human resources offices of the same university. Fig. 7 shows a sample of the presence of the university population in one of the campus buildings, specifically building D.



**Figure 7.** Average number of people present from October 1<sup>st</sup> to 6<sup>th</sup>, 2019 at the facilities of building D of ECIJG  
**Source:** own elaboration.

## 4. Results

Fig. 8 shows the results of the demographic study of the number of people per week and per building on the university campus of ECIJG for the period under study. The average number of people per day staying overnight at the university campus was 2.131 for the same period.

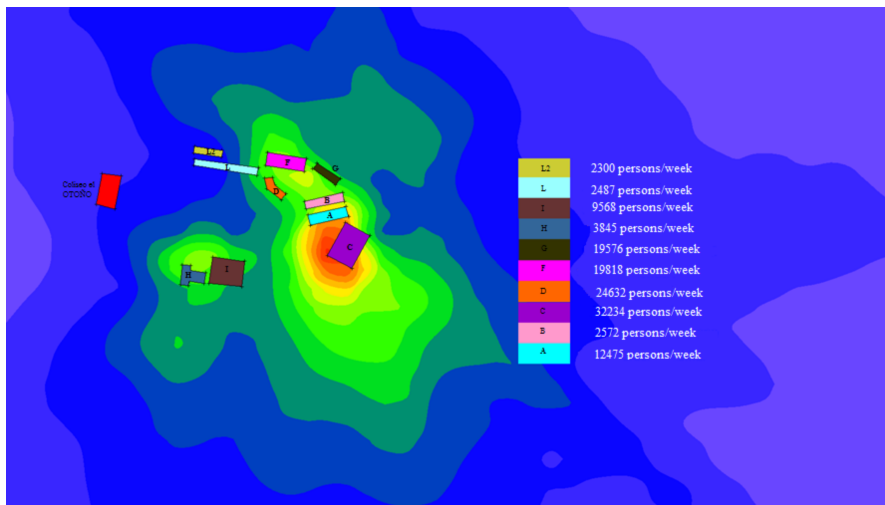
Fig. 9 shows the concentration of particulate matter PM10, PM2,5, and pollutant gases SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, and O<sub>3</sub> found on the university campus during an average day within the period indicated above.

Table II shows the average level of each pollutant factor, the maximum permissible levels, the state of air quality by building, and the population.

**Table II.** Indicators of contaminating factors at ECIJG from October 1<sup>st</sup> to 31<sup>st</sup>, 2019

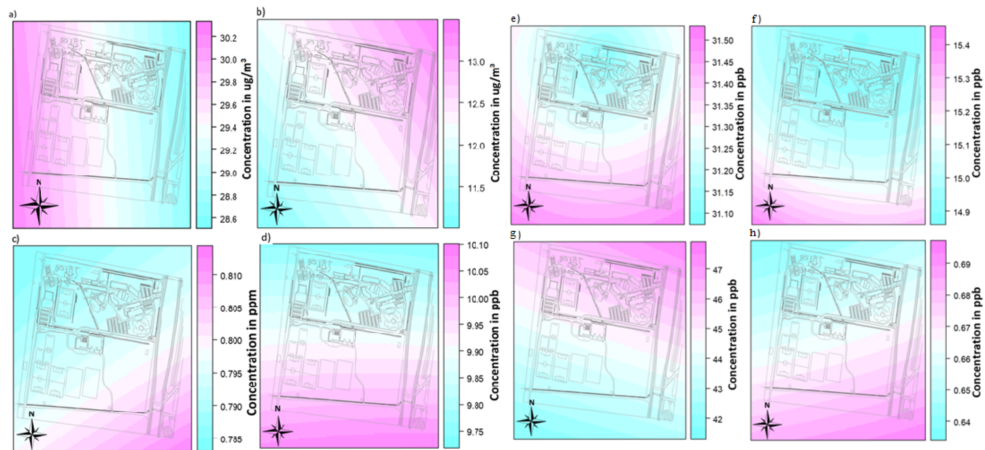
Item	PM 10 ( $\mu\text{m}/\text{m}^3$ )	PM 2.5 ( $\mu\text{m}/\text{m}^3$ )	O <sub>3</sub> (ppb)	NO (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)	NO <sub>x</sub> (ppb)	CO (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppb)
Average value	29 (24h)	12,6 (24h)	9,8 (8h)	31 (1h)	14,9 (1h)	46,1 (1h)	0,79 (8h)	0,65 (24h)
Maximum permissible level*	50	25	80		200		10.000	250
Air quality status*	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable
Building most affected	Coliseum	G	I	I	I	G	C	C
Human population	560	19.576	9.568	9.568	9.568	19.576	32.234	32.234

\*Criteria established in resolution 2.254 of 2017 [24]



**Figure 8.** Distribution of the average human population on the university campus  
**Source:** own elaboration.

The monthly average concentrations of PM10 and PM2,5 during October 2019 showed a similar behavior to the annual report by the environmental control directorate of the district environmental secretariat concerning spatial distribution [1]. The highest concentrations were maintained in the southwest (colosseum) and northeast (building G) of the campus and the lowest in the northeast



**Figure 9.** Distribution of a) PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), b) PM2,5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), c) CO (ppm), d) O<sub>3</sub> (ppb), e) NO (ppb), f) NO<sub>2</sub> (ppb), g) NO<sub>x</sub> (ppb), and h) SO<sub>2</sub> (ppb), in ECIJG

**Source:** own elaboration.

and southwest areas, respectively. In comparison with the concentrations of previous years of the same report [1], for PM10, there is a tendency for concentrations to decrease over time, but PM2,5 concentrations tend to increase.

Monthly concentrations of PM2,5 and PM10 are influenced by variations in the meteorology of each month of the year. The first quarter is characterized by being a dry period, so there is a reduction in wind speed and a greater frequency of thermal inversions. In the second quarter, the rainy season begins, which favors the decrease in concentrations to some extent. The second dry season coincides with September and October, in which concentrations increase again to decrease in December due to the reduction in the activity of several emission sources.

During a typical day, concentrations are low in the early morning, and they increase rapidly until reaching a peak between 7 and 8 a.m. due to the beginning of activity at the emission source, mainly associated with vehicle traffic on the city's northern highway. Because the temperature difference between day and night at the surface is greater in the morning hours, the dispersion of pollutants is low. However, as the day progresses, the surface temperature increases, which favors wind speed and the dispersion of pollutants during the rest of the day. In the afternoon, a slight increase in concentrations is observed, which is associated with vehicle activity at the end of the workday.

The mobile station built during this project monitored CO during October 2019. It recorded valid data in a percentage higher than 65 %. Building C showed the highest average, with 0,79 ppb, and building F recorded the lowest monthly concentration. On an average day, CO concentrations are highest in the morning between 6 and 8 a.m. as well as during the late afternoon and evening, between 5 and 10 p.m. The lowest concentrations are recorded around noon. CO concentrations in 2019 increased at some RMCAB stations relative to previous years, although there was a slight decrease for that year at stations in the southwest. It was observed that the buildings on the university campus - located near the northern highway - are the ones with the highest CO levels, especially due to the influence of the older vehicle fleet. Concerning the maximum permissible levels established by the standard, no exceedances of the hourly and 8-hour moving average data were recorded during 2019.

Building I, located in the southwestern sector of the university campus, recorded the highest monthly average of O<sub>3</sub>, with 9,8 ppb, whereas building G recorded the lowest levels. The behavior of this pollutant has varied over the years, although, historically, the north of the city (the area where ECIJG is located) has recorded the highest concentrations [1]. The harmful tropospheric ozone (O<sub>3</sub>) that exists in the lower layers is not emitted directly into the atmosphere but is produced by the chemical reaction between natural oxygen in the air and nitrogen oxides and hydrocarbons, which act as precursors or facilitators of the chemical reaction in the presence of sunlight. These precursors are emitted directly into the atmosphere; the higher the concentration of these precursors, the higher the ozone production, provided that solar radiation is present. Concentration levels are influenced by the variation of solar radiation during the day, with the highest peaks occurring around 1 p.m. In the morning, concentrations are low, decreasing around 6 a.m., influenced by the increase in NO<sub>2</sub> concentrations, increasing until they peak in the afternoon, and decreasing again after the reduction of solar radiation.

The average week's ozone behavior starts with high concentrations on Monday and decreases until Wednesday. There is a slight increase on Thursday, and a decrease towards Saturday, with a sharp increase on Sunday. Because  $O_3$  is a secondary pollutant, variations in concentration are determined by the concentrations and magnitude of  $O_3$  precursor factors, such as the variation in solar radiation during the year, which predominates in dry seasons, or changes in  $NO_2$  and VOC concentrations.

The highest  $NO_2$  concentrations were recorded in the southwest of the university campus, in building I, with 14,9 ppb, and the lowest concentrations were obtained in buildings F and G. No exceedances of the maximum limits were recorded at both annual and hourly resolutions. Concerning previous years, concentrations have remained similar in most stations since 2015 [15]. The highest concentrations predominate in March and April, decrease in the middle of the year, and increase again between September and October. The variation in  $NO_2$  concentrations coincides with periods of high concentration of particulate matter, since the impact of emissions from combustion processes is more noticeable in the dry season, given that the dispersion capacity of the concentrations is reduced. Concentrations are lowest on Monday, and they gradually increase on Wednesday and then decrease in the following days until Saturday, when the highest concentrations of the week occur. The increase in concentration on weekdays may be influenced by the accumulation of pollution during the week, in addition to chemical reactions occurring in the atmosphere. On Saturdays, there are no mobility restrictions for vehicles, so there may be increases in concentrations due to emissions associated with mobile sources.

In 2019, the highest annual average of  $SO_2$  was recorded in building C with a value of 0,65 ppb. This behavior is influenced by the activity of emission sources during the week (a vehicle fleet with greater use of diesel circulates along the northern highway, both with freight and public transport), as well as on weekends, since there is increased traffic due to the departure of vehicles from the city. No exceedances of the daily limit were recorded. In general, since 2015, there have been slight reductions in concentrations over the years in most of the RMCAB stations [1].

However, the concentration levels of particulate matter and pollutant gases, which were specified in Table II and affect a floating population per building on the campus of ECIJG, allow classifying the average air quality as favorable according to IBOCA, as well as stating that it meets the environmental criteria [25].

## 5. Discussion

The results presented in the previous section allow inferring that 2.131 people benefit daily from the favorable state of air quality in the facilities of ECIJG. Similarly, it is concluded that the pollutant with the greatest potential for affecting the university campus is particulate matter of less than 2,5 microns ( $PM_{2,5}$ ), a result that coincides with that reported by the SDA [26] for Bogotá. It is recommended that members of the academic community, among other measures, use public transportation or opt for bicycles for commuting from their homes to the institution and vice-versa. Wet sweeping (general services) is also recommended, and vehicle users should avoid filling the gas tank of the car to the maximum to contribute to maintaining or improving air quality on campus.

Additionally, it is necessary for Colombia to evaluate the coverage of its weather stations to know if their number and distribution throughout the territory are sufficient and adequate to monitor the quality of the air that its citizens breathe. In the specific case of the RMCAB, it is recommended that the number be increased to cover the entire urban area, and that some of the existing stations be equipped with the necessary equipment to measure all pollutant factors. Similarly, a reevaluation of the limits established by the Colombian standard for determining air quality should be carried out because it is laxer than the one suggested by the World Health Organization (WHO). For example, while the Colombian limit for PM10 is  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , the WHO recommendation is  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

With the increase in the number of measurement points in a reduced area, future work could focus on determining specific places that are not complying with health regulations and send a timely warning to the population, analyzing the data with unsupervised learning in real time.

Considering the relationship of more variables in the dispersion of the gases, it is also possible to look for an interpolation model in which parameters such as prevailing winds (and their intensities), orography, and buildings are considered to find better gas distribution approximations.

## 6. Conclusions

The air pollutant emission inventory for the university campus of ECIJG during October 2019 allowed quantifying the emissions of a specific area (which is ideal to have a general overview of the state of emissions at the city level) generated by different pollutant sources. It provided technical information that serves the environmental authority for the following purposes: a diagnostic tool to manage the air quality of a part of the Suba locality, technical support for the formulation of policies and strategies to mitigate pollution, input information to evaluate the effectiveness of actions through air quality modeling, and the periodic generation of air quality forecasts, among other purposes.

In this type of studies, it is important that the measurement of the values of air pollution factors, in the case of this research, CO and SO<sub>2</sub>, be carried out with the same criteria established by the Ministry of Environment and the regional governments in order to avoid different reports that confuse citizens. This type of exercise provides baseline data for air preservation policies.

From the study, it can be concluded that the air quality in ECIJG is favorable and that 2.131 people benefit daily from these conditions. On the other hand, the implemented IoT network complies with the conditions of correct transmission and real-time information retrieval. This was validated in the server with the measured values of carbon monoxide and sulfur dioxide, which were previously measured and sent from the monitoring point.

The correct integration of the data in the web server, as well as their analysis performed in the R language, allowed determining the approximate indicators of the polluting factors in the reference area of the university campus of ECIJG, which was correlated with the population occupying its facilities from October 1<sup>st</sup> to 31<sup>st</sup>, 2019, in order to determine the affected population.

## 7. Acknowledgment

This work has been supported by Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito and Universidad Distrital Francisco José de Caldas, both located in Bogotá D.C., Colombia, which funded the project with code PRY19.

## References

- [1] “Informe anual de Calidad del Aire. Red de monitoreo de la calidad del aire en Bogotá”, Secretaría del Medio Ambiente, 2019. <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/IA%20200531%20Informe%20Anual%20de%20Calidad%20del%20Aire%20A%C3%B1o%202019.pdf> (accessed January 26 th , 2019). ↑403, 413, 414, 415
- [2] C. H. Cheng and C. C. Ho, “Implementation of multi-channel technology in ZigBee wireless sensor networks”, *Comp. Elec. Eng.*, vol. 56, pp. 498-508, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.10.002> ↑404
- [3] N. C. Batista, R. Melicio, V. M. F. Mendes, and J. Figueiredo, “Wireless Monitoring of Urban Wind Turbines by ZigBee Protocol: Support Application Software and Sensor Modules”, *Procedia Tech.*, vol. 17, pp. 461-470, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.182> ↑404
- [4] N. Samotaev, A. Ivanova, K. Oblov, S. Soloviev, and A. Vasiliev, “Wi-fi wireless digital sensor matrix for environmental gas monitoring”, *Procedia Tech.*, vol. 87, pp. 1294-1297, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.684> ↑404
- [5] S. Choudhury, P. Kuchhal, R. Singh, and A. Gehlot, “Zigbee and bluetooth network based sensory data acquisition system”, *Procedia Comp. Sc.*, vol. 48, pp. 367-372, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.195> ↑405
- [6] J. Gutiérrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, and M. Á. Porta-Gándara, “Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module”, *IEEE Trans. Inst. Meas.*, vol. 63, no. 1, pp. 166-176, 2014. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2276487> ↑405
- [7] M. Benganem, “RETRACTED: A low-cost wireless data acquisition system for weather station monitoring”, *Renewable Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 862-872, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.024> ↑405
- [8] M. Haefke, S. C. Mukhopadhyay, and H. Ewald, “A Zigbee based smart sensing platform for monitoring environmental parameters,” in *2011 IEEE Int. Inst. Meas. Tech. Conf., Hangzhou, China*, Jul. 2011. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2011.5944154> ↑405
- [9] A. Marini, P. Mariani, A. Garinci, S. Proietti, P. Sdringola, M. Proietti, and M. Marconi. “Design of an Urban Monitoring System for Air Quality in Smart Cities”, *Smartgreens*, pp. 94-101, 2021. <https://doi.org/10.5220/0010405200940101> ↑405
- [10] Y. Irawan, R. Wahyuni, H. Fonda, M. Hamzah, and R. Muzawi. “Real Time System Monitoring and Analysis-Based Internet of Things (IoT) Technology in Measuring Outdoor Air”, *Int. J. Interac. Mob. Tech.*, vol. 15, no. 10, 2021. doi: <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i10.20707> ↑405
- [11] N. Bansod and U. Hore, “IoT Based Air Quality Monitoring System”, *Int. J. Adv. Res. Sc. Comm. Tech.*, vol. 6, no. 2, 20707, 2021. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-1536> ↑405
- [12] A. Nagah and M. Rebaudengo, “LoRaWAN for Air Quality Monitoring System.”, M.Sc. thesis, Politecnico di Torino, Italy, 2021. [Online]. Available: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/18045> ↑405
- [13] E. Twahirwa, K. Mtonga, D. Ngabo, and S. Kumaran, “A LoRa enabled IoT-based Air Quality Monitoring System for Smart City”, *2021 IEEE World AI IoT Cong. (AIIoT)*, pp. 0379-0385, 2021. <https://doi.org/10.1109/AIIoT52608.2021.9454232> 10.1109/DAAS.2018.8396074 ↑405
- [14] A. Szpiro, P. D. Sampson, L. Sheppard, and T. Lumley, “Predicting intra-urban variation in air pollution concentrations with complex spatio-temporal dependencies”, *Environmetrics*, vol. 21, no. 6, pp. 606-631, 2009. <https://doi.org/10.1002/env.1014> ↑405
- [15] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larjani, A. Tait, A. Ahmadinia, and N. Strachan, “Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks”, in *2016 IEEE SENSORS*, Orlando, FL, USA, 2016. <https://doi.org/10.1109/SENSOR.2016.7793441>



- [org/10.1109/ICSENS.2016.7808712](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808712) ↑406, 415
- [16] M. I. Muzamir, H. Z. Abidin, S. A. C. Abdullah, and F. H. K. Zaman, "Performance Analysis of LoRaWAN for Indoor Application", *2019 IEEE 9th Symp. Comp. App. Ind. Elec. (ISCAIE)*, pp. 156-159, 2019. <https://doi.org/10.1109/ISCAIE.2019.8743982> ↑406
- [17] A. Lavric and AI Petriariu, "Protocolo de comunicación LoRaWAN: La nueva era de IoT", *Conferencia Internacional sobre Desarrollo y Sistemas de Aplicación (DAS)*, 2018, pp. 74-77. <https://doi.org/10.1109/DAAS.2018.8396074> ↑406
- [18] M. A. Oliver and R. Webster, "Kriging: a method of interpolation for geographical information systems", *Int. J. Geog. Inf. Sys.*, vol. 4, no. 3, pp. 313-332, 1990. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549> ↑406
- [19] Y. Tong, Y. Yu, X. Hu, and L. He, "Análisis del rendimiento de diferentes métodos de interpolación de kriging basados en el índice de calidad del aire en Wuhan", *Sexta Conferencia Internacional sobre Control Inteligente y Procesamiento de la Información (ICICIP)*, pp. 331-335, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICICIP.2015.7388192> ↑406
- [20] R. Hernández-Sampieri, C. Fernández-Collado, and M. P. Baptista-Lucio, *Metodología de la Investigación*, Ciudad de México, México: McGraw Hill, 2013. ↑406
- [21] "Mq136 Semiconductor Sensor for Sulfur Dioxide," Hanwei Electronics Co, 2020. <http://www.datasheet.es/download.php?id=904647> ↑408
- [22] "Technical Data Mq-7 Gas Sensor," Hanwei Electronics Co. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7.pdf> (accessed April 17th, 2019). ↑409
- [23] C.-T. Yang, S.-T. Chen, J.-C Liu, P.-L. Sun, and N. Y. Yen, "On construction of the air pollution monitoring service with a hybrid database converter", *Soft. Comput.*, vol. 24, pp. 7955-7975, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04079-z> ↑409
- [24] "The Sustainable Development Goals Report", United Nations, 2017. <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2017/thesustainabledevelopmentgoalsreport2017.pdf> (accessed Jun. 27<sup>th</sup>, 2019) ↑412
- [25] R. Li, Z. Li, W. Gao, W. Ding, Q. Xu, and X. Song, "Diurnal, seasonal, and spatial variation of PM<sub>2.5</sub> in Beijing", *Sc. Bull.*, vol. 60, no. 3, pp. 387-395, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0607-9> ↑415
- [26] "Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá," RMCAB, Secretaría Distrital de Ambiente. <http://201.245.192.252:81/home/map> (accessed November 13th, 2019). ↑415

---

### Hernán Paz Penagos

Paz-Penagos, H. received his Ph.D. degree from Universidad Pedagógica Nacional in 2012 and his master's degree from Universidad Distrital Francisco José de Caldas in 2002, both in Colombia. Over the past 10 years, his work has focused on various aspects of PLC, RF, and wireless communications, including channel characterization, digital system design, among others. He has published more than 25 scientific articles and seven books on some research topics.

E-mail: herman.paz@escuelaing.edu.co

---

### Andrés Alejandro Moreno Sánchez

Moreno-Sánchez, A. A. received his technical degree in residential electrical installations from SENA in 2015 and his degree in electronic engineering with an emphasis on digital electronics from Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito in 2019. He is currently a master's student in electronic engineering at the same university.

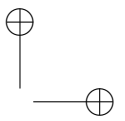
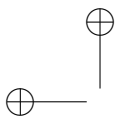
E-mail: andres.moreno-s@mail.escuelaing.edu.co

---

### José Noé Poveda Zafra

Poveda-Zafra, J. obtained his electronic engineering degree from Universidad Distrital Francisco José de Caldas in 1998 and his master's degree in Teleinformatics from the same university in 2002. Since 2000, he has been a professor at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, and he is currently a member of the Telecommunications Research Group, also called GITUD, with projects on IoT.

E-mail: jpoveda@udistrital.edu.co



Research

## Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016

*Lightning Activity in the Department of Santander between 2014 and 2016*

**Brandon Steven Ardila\***<sup>ID</sup><sup>1</sup>, **Edison Andrés Soto**<sup>ID</sup><sup>1</sup>, **Kevin Alberto Velandia**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL, Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia)

correspondence e-mail: brandon2208141@correo.uis.edu.co - easotor@uis.edu.co

Recibido: 08/04/2021. Modificado: 24/08/2021. Aceptado: 08/09/2021.

### Abstract

**Context:** In this paper, the ground flash density (GFD) parameter in Santander (Colombia) is determined, and a study of lightning activity in the department from 2014 to 2016 is conducted.

**Method:** The departmental territory was divided into 1 km<sup>2</sup> squares, and, through data regarding cloud-to-ground discharges obtained from the Colombian Total Lightning Detection Network (LINET), the number of annual average flashes per square was found, which corresponds to the GFD parameter. Likewise, using statistical methods, the spatial and temporal variation, multiplicity, and peak return discharge current of the flashes that affected the department were analyzed.

**Results:** The areas with the highest GFD values are located in the municipalities of Suaita, Gámbita, Bolívar, Oiba, and Charalá. On average, 183.199 annual flashes were recorded, out of which 54,14 % have a multiplicity equal to one. Lightning activity peaks were observed in the months of April, May, September, and October between 16:00 and 18:00 and between 22:00 and 4:00 h, as well as mean annual current values of 33,6 kA for negative discharges with average maximum values in the months of October, November, and December, and of 25,7 kA for positive discharges with average maximum values in the months of April, October, and November.

**Conclusions:** A marked influence of the terrain's topography and altitude was found on the incidence of atmospheric discharges in the department, given that the municipalities with the highest lightning activity are located on the sides of high mountain ranges at altitudes less than 1.500 m.a.s.l., and the municipalities with less activity are located on moors and hills at heights between 3.000 and 3.500 m.a.s.l.

**Keywords:** lightning activity, ground flash density, flashes, LINET network

**Acknowledgements:** We would like to thank the Keraunos company for supplying data from the Colombian network for Total Lightning Detection with LINET technology, through which the analysis of lightning activity in Santander was carried out; and Dr. Diego del Río for supplying the script to determine the multiplicity of lightning events and additional contributions for the development of this article.

**Language:** Spanish

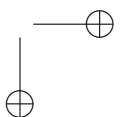
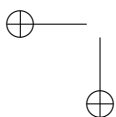
### Open access



Cite this paper as: Ardila, B., Soto, E., Velandia, K.: Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 419:435.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.17585>



### Resumen

**Contexto:** En este artículo se determinó el parámetro de densidad de descargas a tierra (DDT) en Santander (Colombia) y se hizo un estudio de la actividad de rayos en el departamento entre 2014 y 2016.

**Método:** El territorio departamental se dividió en recuadros de  $1 \text{ km}^2$  y, mediante información de descargas a tierra obtenida de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET, se halló la cantidad de *flashes* promedio anuales por recuadro, lo que corresponde al parámetro de DDT. Así mismo, usando métodos estadísticos, se analizó la variación espacial, temporal, multiplicidad y corriente pico de descarga de retorno de los *flashes* que incidieron en el departamento.

**Resultados:** Las zonas con mayores valores de DDT se ubican en los municipios de Suaita, Gámbita, Bolívar, Oiba y Charalá. En promedio, se registraron 183.199 *flashes* anuales, de los cuales el 54,14 % tiene multiplicidad igual a uno. Se observaron picos de actividad de rayos en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre entre las 16:00 y las 18:00 y las 22:00 y las 4:00, así como valores de corriente anual media de 33,6 kA para descargas negativas con valores máximos promedio en los meses de octubre, noviembre y diciembre, y de 25,7 kA para descargas positivas con valores máximos promedio en los meses de abril, octubre y noviembre.

**Conclusiones:** Se encontró una marcada influencia de la topografía y de la altitud del terreno en la incidencia de descargas atmosféricas en el departamento, ya que los municipios con mayor actividad de rayos se ubican a los costados de altas cadenas montañosas a alturas menores que 1.500 msnm y los municipios de menor actividad se sitúan sobre páramos y cerros a alturas entre 3.000 y 3.500 msnm.

**Palabras clave:** actividad de rayos, densidad de descargas a tierra, descargas atmosféricas, red LINET

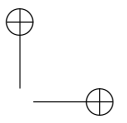
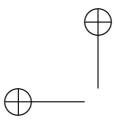
**Agradecimientos:** A la empresa Keraunos por el suministro de datos de la red Colombiana de Detección Total de Rayos con Tecnología LINET mediante los cuales se realizaron los análisis de la actividad de rayos en Santander. Al Dr. Diego del Rio por suministrar el script para determinar la multiplicidad de los eventos de rayo y aportes adicionales para el desarrollo de este artículo.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

El rayo es un fenómeno electromagnético que puede afectar los sistemas eléctricos, electrónicos, de comunicaciones y el transporte, ocasionando pérdidas económicas, de bienes culturales, servicios públicos y vidas humanas [1], [2]. Estudios realizados han mostrado que los lugares de mayor ocurrencia del fenómeno del rayo en el mundo están ubicados en la zona tropical [3]–[7]. Así mismo se ha mostrado que la actividad eléctrica atmosférica es elevada comparada con latitudes templadas [8] y que los parámetros del rayo varían espacial y temporalmente, muestra de ello es que la mediana de la corriente de descarga medida en zonas templadas alcanza los 30 kA [9], mientras que en regiones tropicales llega a 45 kA [10]. Investigaciones demuestran que siete de los diez lugares con mayor actividad de rayos en Suramérica están en Colombia, en donde su relieve y la convergencia de vientos favorecen la formación de tormentas [3], por lo que parámetros como la densidad de descargas a tierra (DDT) son de hasta 60 *flashes*/km<sup>2</sup>/año [6].

Para determinar el parámetro de densidad de descargas a tierra se han utilizado ecuaciones que lo relacionan con el nivel cerámico [2], el cual corresponde a la cantidad de días tormentosos al año. También se han empleado sistemas de localización de rayos LLS (por su sigla en inglés, Lightning



Location System), los cuales fueron implementados gracias al avance de los sistemas electrónicos. Estos sistemas capturan las señales electromagnéticas emitidas por el rayo y determinan la ubicación a través de diferentes algoritmos que relacionan al menos tres sensores que han detectado la señal, permitiendo determinar la ubicación espaciotemporal de la descarga [11].

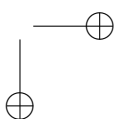
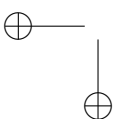
En 1997 se instaló el primer LLS en Colombia, conocido como Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas - RECMA [1]. La RECMA estuvo en operación durante el periodo de 1997 a 2001, y estaba conformada por seis sensores LPATS (Lightning Position and Tracking System), que se instalaron en el territorio colombiano en lugares estratégicos con el fin de dar cubrimiento a la red de transmisión propiedad de la empresa ISA (Interconexión Eléctrica S.A.). Esta red detectaba rayos tipo nube-tierra (CG - Cloud to Ground) entregando datos de día, mes, año, minuto, segundo, milisegundo, latitud, longitud y corriente de cada *stroke* detectado por la red [1], [12].

Con base en los registros de la RECMA se pudo realizar una primera caracterización del fenómeno, permitiendo obtener la variación espaciotemporal de parámetros como DDT, polaridad, multiplicidad y valores de corriente pico en el territorio colombiano [13]. Uno de los resultados relevantes fue que zonas como la del Magdalena Medio presentaban mayor actividad eléctrica atmosférica y que en algunas como la sabana de Bogotá la actividad no era tan alta. La DDT obtenida con esta red en algunos lugares superaba los referentes internacionales que se tenían para el año 2002 [1], [13]. A pesar de los grandes aportes que se obtuvieron a través de la RECMA, esta presentaba algunas limitaciones en la localización de las descargas, debido a que algunos sensores se encontraban alineados [1].

Luego, en el año 2007, la red fue actualizada con los sensores LS7001 (por su sigla en inglés, LS - Lightning Sensor) y se convirtió en el Sistema de Información de Descargas Atmosféricas - SID [7]. Esta red estaba en la capacidad de detectar rayos tipo CG y estuvo en operación hasta el año 2016. En el año 2011 entró en operación la Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET propiedad de la empresa Keraunos E.S.P., la cual permite detectar rayos nube-tierra e intra-nube. Desde su instalación en septiembre de 2011 hasta finales de 2018 la red detectó más de 64.000.000 de descargas [14].

La actividad de rayos en Colombia se ha presentado a través de mapas, inicialmente en 1974 se elaboró el primer mapa de nivel isoceraúnico realizado por el HIMAT (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, actualmente IDEAM). Luego, en 1990, se realizó una actualización teniendo en cuenta los promedios aritméticos multianuales entre 1974 y 1988 [1]. Posteriormente, con la entrada en operación de los LLS, se han elaborado distintos mapas de DDT, en el 2002 el trabajo realizado por Younes presenta un mapa de DDT del área de mayor eficiencia de detección de la RECMA. En la norma de protección contra rayos NTC 4552 de 2008 se actualizaron el mapa de niveles isoceraúnicos y se presentaron valores de DDT para algunas ciudades y municipios del país con base en la información de la RECMA.

Después, en la norma de protección contra rayos NTC 4552 de 2008 se actualizó el mapa de niveles isoceraúnicos y se presentaron valores de DDT para algunas ciudades y municipios del país. Trabajos posteriores presentaron un mapa nacional de DDT para 2012, usando áreas de  $3 \times 3$  km



en donde se ubicaron las zonas más activas en cuanto a rayos, que corresponden al Valle del río Magdalena y al Catatumbo [15]. En 2014 se actualiza el mapa para 2012 y 2013 usando la misma resolución espacial y se relaciona el cambio de este parámetro con la altitud [4]. En 2018 se publicó un estudio de 14 años de actividad de rayos en el periodo de 1997 a 2001 y de 2007 a 2015, en el cual se muestra la variación de parámetros como multiplicidad, polaridad, corriente pico de descarga de retorno y DDT [7].

En 2019 se presentó un mapa de DDT para regiones naturales de Colombia en el periodo entre 2012 y 2017 usando la misma dimensión de recuadros [16].

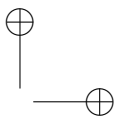
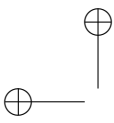
Conocer el valor de la densidad de descargas a tierra es de suma importancia para determinar el indicador de exposición al rayo en estructuras elevadas, con el fin de diseñar sistemas de protección óptimos y eficientes, y de esta manera disminuir el nivel de riesgo ante descargas atmosféricas. Así mismo, usar datos exactos de este parámetro es fundamental para garantizar la confiabilidad de líneas de transmisión y distribución, puesto que realizar diseños usando valores generalizados puede sobredimensionar los cálculos debido a la variación de la DDT con la altitud del terreno mostrada en [4].

Hasta el momento no se han realizado estudios en Santander (Colombia) que presenten la variación espacial y temporal de descargas atmosféricas ni se han caracterizado parámetros como la multiplicidad y la corriente pico de descarga de retorno. Tampoco se han realizado mapas de densidad de descargas a tierra usando recuadros de  $1 \times 1$  km ni se ha explicado el comportamiento de este parámetro con base en la influencia de las cadenas montañosas del departamento. Teniendo en cuenta lo anterior, este artículo presenta un estudio sobre la actividad de rayos en el departamento de Santander entre los años 2014 y 2016, determinando los municipios con mayor y menor densidad de descargas a tierra promedio, el comportamiento mensual y el horario de los flashes registrados, así como la variación de la multiplicidad y de la corriente de descarga de retorno. Finalmente se presenta el mapa de DDT del departamento y se determinan los veinte sitios para los cuales este parámetro presenta los valores máximos.

## 2. Metodología

### 2.1. Zona de estudio

El departamento de Santander está compuesto por 87 municipios y se encuentra ubicado en la zona noreste de Colombia formando parte de la región Andina, tiene aproximadamente 2.090.854 de habitantes (2018), siendo el séptimo departamento más poblado del país y el cuarto en cuanto a desarrollo económico. Su relieve se ve influenciado al oeste por el valle medio del río Magdalena y al este por la cordillera oriental con mesetas de gran extensión como Bucaramanga, Ruitoque, Berlín y Los Santos, y montañas de mediana elevación separadas del cuerpo de la cordillera que forman parte de la Serranía de los Yariguíes, así como montañas que superan los 4.000 msnm en donde se encuentran los páramos Anagá y El Almorzadero, este último con picos que llegan hasta los 4.500 msnm.



## 2.2. Datos y software

La información de descargas a tierra empleada en este estudio proviene de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología LINET [17]–[20]. Esta red “Total Lightning” que opera en los rangos de frecuencia VLF/LF entrega para cada evento datos como fecha, hora, latitud, longitud, altura, tipo, corriente y error. LINET está compuesta por sensores que detectan el campo magnético generado por los impulsos electromagnéticos del rayo a través de un arreglo de dos antenas de lazo ortogonales entre sí. Esta red emplea la técnica de tiempo de arribo (por su sigla en inglés, TOA - Time of Arrival) para entregar los datos de posición de cada evento (Betz). El conjunto de datos que se empleó para realizar el análisis de la actividad de rayos del departamento de Santander corresponde a los eventos detectados entre 2014 y 2016. Se usó el software QGIS, que es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto licenciado bajo GNU - General Public License, siendo un proyecto de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

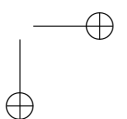
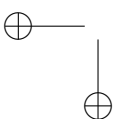
## 2.3. Procesamiento

Con base en información de actividad de rayos brindada por la red LINET se ubicaron geográficamente las descargas (*strokes*) que incidieron en el recuadro que contiene al departamento de Santander (margen inferior izquierdo LA: 5.473958, LO: -74.653667; margen superior derecho LA: 8.622944, LO: -72.394531). Usando las herramientas de selección por localización se descartaron las descargas que impactaron fuera del recuadro y se logró individualizar la actividad dentro del departamento y en cada municipio de Santander para realizar un estudio más específico.

Se procesaron los *strokes* mediante un script desarrollado en [11], que permite agruparlos en flashes y asigna un valor de multiplicidad a cada evento de acuerdo con la cantidad de descargas subsecuentes que contenga (para que un conjunto de *strokes* formen parte de un flash deben estar separados en el espacio por distancias menores a 10 km y tiempos menores a 1 segundo entre el primer y segundo *stroke* y 500 m a partir del segundo). De esta forma se logra obtener una base de datos de los flashes en Santander, la cual se redujo a un tercio del tamaño original. En adelante la cantidad de rayos se medirá en flashes.

## 2.4. Determinación de la DDT

Ubicando los datos procesados de la red LINET, se encerró la superficie del departamento de Santander dentro de una cuadrícula donde cada recuadro tiene un área de 1km<sup>2</sup>, según QGIS Santander tiene una extensión de 30.537 km<sup>2</sup>. Se realizó el conteo de los flashes promedio anuales que inciden dentro de cada uno de estos recuadros con la opción *contar puntos en polígonos* de las herramientas de análisis de la pestaña vectorial del software; por motivos de la falta de visualización de los números dentro de cada uno de los pequeños recuadros se le dio un tono en una paleta de color espectral en la que los valores van desde 0 hasta 60 flashes dependiendo del año, para luego sacar un promedio entre los tres años de estudio.



### 3. Resultados

#### 3.1. Variación espacial

La Tabla I muestra los municipios con mayor actividad de rayos en el departamento de Santander de acuerdo con el parámetro de densidad de descargas a tierra promedio [15], el cual se calcula mediante el cociente flashes promedio / área del municipio y se interpreta como la cantidad de flashes anuales que se registrarían en cada kilómetro cuadrado del municipio si la totalidad de flashes incidentes en el mismo se distribuyeran de manera uniforme sobre su superficie. Este parámetro se halla con el único fin de realizar comparaciones en la actividad de rayos entre los municipios y no corresponde a la densidad de descargas a tierra que se hallará posteriormente, determinando el número de flashes anuales que impactan en un área de 1 km<sup>2</sup>, es decir, un conteo de flashes por cada recuadro ubicado a lo largo del departamento [22].

**Tabla I.** Municipios con mayor actividad de rayos en Santander

Municipio	Flashes promedio	Área [km <sup>2</sup> ]	DDT promedio flashes/km <sup>2</sup> /año
Bolívar	12.047	957,2	12,59
Cimitarra	373.123	3.165,6	11,79
Gámbita	6.856	606,7	11,30
Suaita	3.341	296	11,29
Oiba	3.210	285	11,26
La Belleza	2.726	259	10,52
Puerto Parra	7.427	745	9,97
Charalá	3.976	411	9,67
Barrancabermeja	11.146	1.154	9,66

Es así como municipios ubicados al oeste del departamento que limitan con el río Magdalena, como Bolívar, Cimitarra, Barrancabermeja y Puerto Parra, presentan una importante actividad de rayos. Lo anterior se puede explicar dado que estos municipios, como lo muestra la Figura 1, se encuentran al costado occidental de la Serranía de los Yariquíes o también llamada Cordillera de los Cobardes y estas montañas, que alcanzan alturas de hasta 3.475 msnm, actúan como barrera natural para los vientos húmedos y cálidos que circulan por la zona forzándolos a subir, lo que favorece la transferencia de carga por colisión entre partículas de hielo y granizo presentes en la atmósfera y por tanto la formación de tormentas eléctricas en los municipios nombrados, en los cuales la mayoría de su territorio se ubica a alturas menores a 150 msnm. Ese mismo efecto ocurre al costado oriental de dicha serranía, en donde municipios como Charalá, Suaita, Gámbita y Oiba, ubicados en una pequeña zona al suroriente del departamento que limita con Boyacá, muestran una importante actividad de rayos que también se ve afectada por el Páramo Carnicerías de Guanque, ubicado al oriente de los municipios nombrados y que alcanza alturas hasta de 4.170 msnm.

En la Tabla II se presentan los municipios con la menor actividad de rayos de acuerdo con la densidad de descargas a tierra promedio. Estos nueve municipios se ubican sobre el Alto del Peñón, el Páramo El Almorzadero y el Páramo Anagá a alturas que oscilan entre 3.000 y 3.500 msnm como se muestra en la Figura 1, de lo que se infiere la influencia de parámetros como la altitud en la



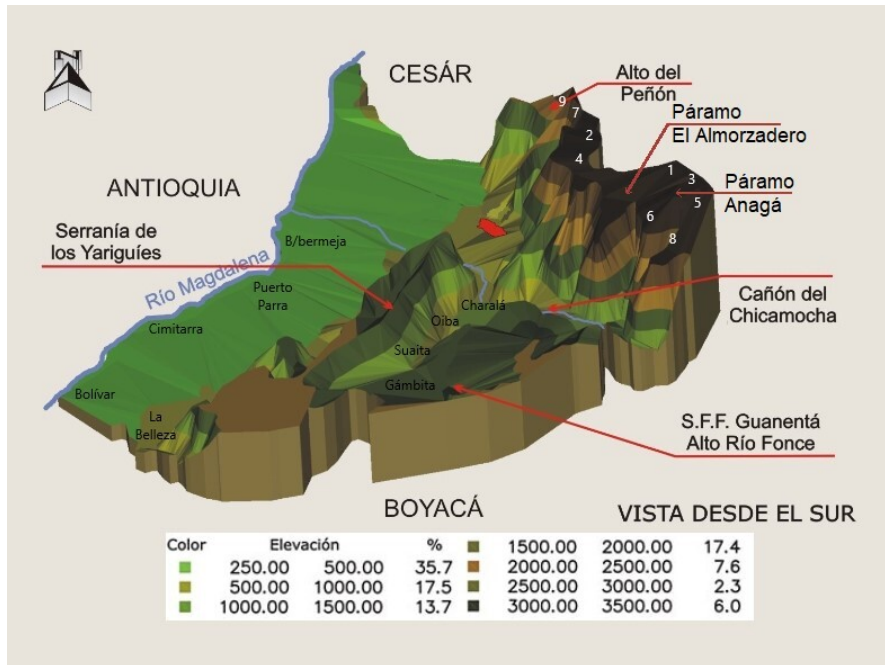


Figura 1. Relieve de Santander

Fuente: Sociedad Geográfica de Colombia, Atlas de Colombia, IGAC, 2002

disminución de la cantidad de impactos de rayo en zonas que se ubican en relieves elevados. Esto se puede explicar porque en estas zonas, al ser páramos, no existen barreras naturales que permitan que el aire se eleve; además a mayor altitud, la presión atmosférica disminuye y por tanto el aire se expande, y disminuye su temperatura, lo que causa ambientes más fríos, en los cuales tiende a disminuir la formación de tormentas [15].

Tabla II. Municipios con menor actividad de rayos en Santander

Municipio	ID	Flashes promedio	Área [km <sup>2</sup> ]	DDT promedio flashes/km <sup>2</sup> /año
Cerrito	1	88	416	0,21
Vetas	2	26	93	0,28
Concepción	3	141	333	0,42
Tona	4	158	342	0,46
Carcasí	5	132	259.8	0,51
Enciso	6	49	79	0,62
California	7	36	52,6	0,69
Capitanejo	8	57	81	0,70
Suratá	9	263	368	0,72



En general el área metropolitana de Bucaramanga, conformada por los municipios mostrados en la Tabla III, presenta una baja actividad de rayos, dado que se tiene en promedio entre 1,87 y 0,76 flashes/km<sup>2</sup>/año.

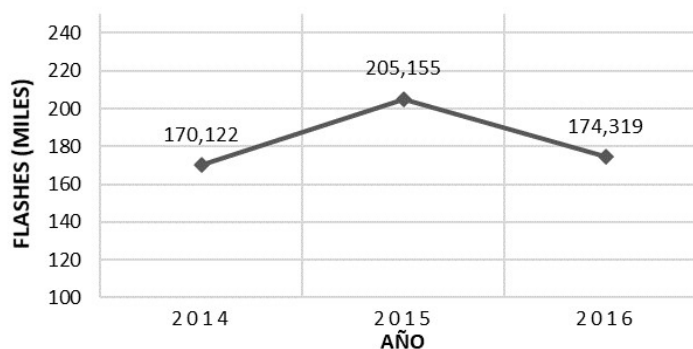
**Tabla III.** Actividad de rayos en los municipios del área metropolitana de Bucaramanga

Municipio	Flashes Promedio	Área [km <sup>2</sup> ]	DDT promedio flashes/km <sup>2</sup> /a
Girón	889	745,1	1,87
Bucaramanga	167	162	1,03
Piedecuesta	408	481	0,85
Floridablanca	76	101	0,76

### 3.2. Variación temporal

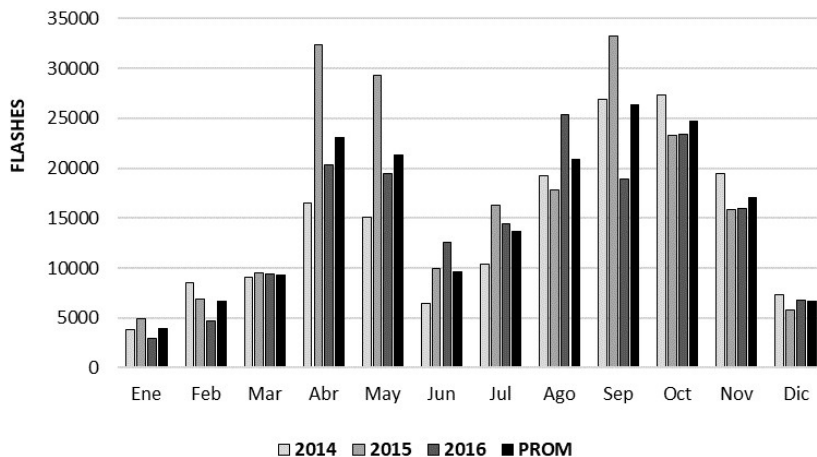
La actividad de rayos en el departamento de Santander fue en promedio de 183.199 flashes por año, de los cuales el 76,5 % son de polaridad negativa y presentó un pico de 205.155 en 2015, aumentando un 20 % con respecto a 2014, año en el cual hubo 170.122. En 2016 se registraron 174.319 flashes y un crecimiento de la actividad del 2,5 % con respecto al primer año de estudio. La información anterior se observa en la Figura 2.

La Figura 3 muestra la incidencia de rayos por mes y el promedio mensual de los tres años de estudio, en donde se evidencia un comportamiento bimodal con valores máximos en abril, mayo, septiembre y octubre, de los cuales los tres primeros corresponden a los meses tormentosos del año en los que se registraron en promedio más de 23.000 flashes. Lo anterior es congruente con la actividad de rayos en regiones centrales del país estudiadas en [13]. El periodo de baja incidencia se presenta entre los meses de diciembre y enero con un promedio menor a 6.700 flashes.



**Figura 2.** Comportamiento de la incidencia de flashes nube-tierra en Santander

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 3.** Cantidad de flashes nube-tierra por meses de 2014 a 2016

**Fuente:** Elaboración propia.

La Figura 4 muestra la variación en la cantidad de flashes promedio según la hora local colombiana UTC-5. Se evidencian dos franjas de alta actividad, una de ellas entre las 16:00 y las 18:00 h cuando se registra un pico de 12.300 flashes, a las 17:00 h; la otra entre las 22:00 y las 4:00 h con un valor máximo de 13.894 flashes a la 1:00 h, lo anterior según [16] se presenta dado que en zonas montañosas puede haber tormentas de corta duración en horas de la tarde, las cuales en zonas de baja altitud se extienden hasta la madrugada. Entre las 8:00 y las 13:00 h se reduce al mínimo la actividad con menos de 2.000 flashes por hora.

### 3.3. Multiplicidad

La Figura 5 muestra el promedio de flashes anuales en función de su multiplicidad. El 54 % de los flashes anuales promedio tienen multiplicidad igual a uno, 17 % igual a dos, 9 % igual a tres y 6 % igual a cuatro. Solo un promedio de 1.559 flashes al año presenta más de diez descargas subsecuentes y un promedio de 25 flashes presenta más de veinte. La multiplicidad máxima en 2014 fue de 24, en 2015 de 41 y en 2016 de 32. En cuanto a la polaridad, se tiene que el 14 % de flashes negativos presenta más de cuatro descargas subsecuentes, mientras que solo el 6 % de los flashes positivos presenta esta misma característica.

### 3.4. Corriente pico de la descarga de retorno

La Figura 6 presenta la variación mensual de la corriente pico promedio de la descarga de retorno, para ello se tuvieron en cuenta corrientes pico de descargas positivas y negativas de más de 15 kA con el fin de tener resultados comparables con otros artículos como [15].

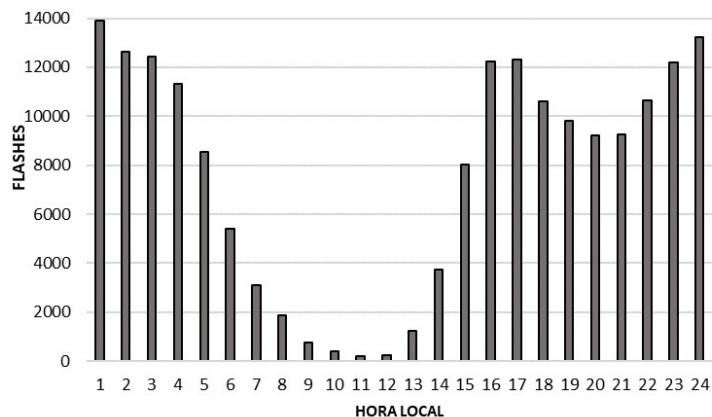


Figura 4. Cantidad de flashes nube-tierra promedio por horas de 2014 a 2016

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene una corriente anual media de 33,6 kA para descargas negativas con valores máximos promedio en los meses de octubre, noviembre y diciembre, que varían entre 35,4 kA y 38,3 kA y valores mínimos promedio en febrero y marzo de 30,7 kA y 28,9 kA respectivamente. En cuanto a descargas positivas, se observa un comportamiento uniforme cuya corriente media anual fue de 25,7 kA con valores máximos promedio en los meses de abril, octubre y noviembre, que varían entre 26,8 kA y 27 kA, y valores mínimos promedio de 25,1 kA en los meses de enero y junio.

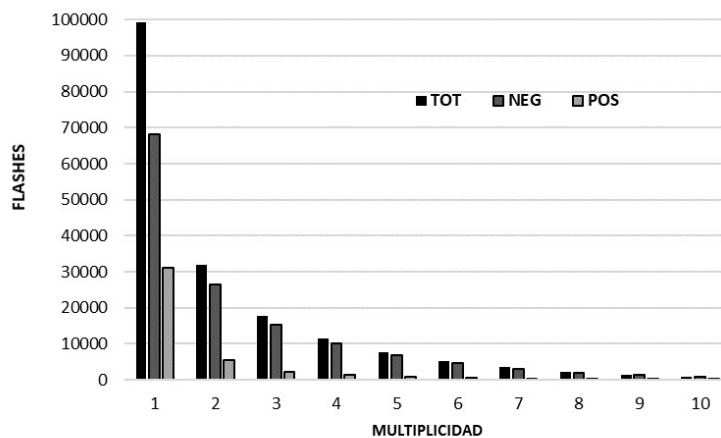
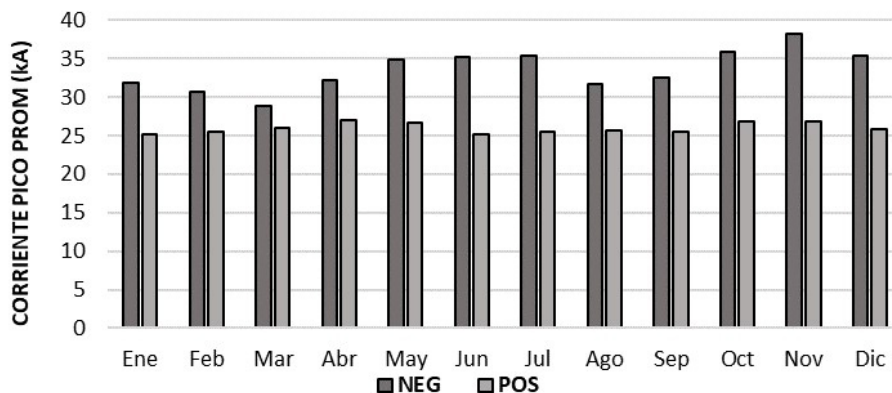


Figura 5. Multiplicidad de flashes nube-tierra promedio anuales

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.** Corriente pico promedio de la descarga de retorno por mes

**Fuente:** Elaboración propia.

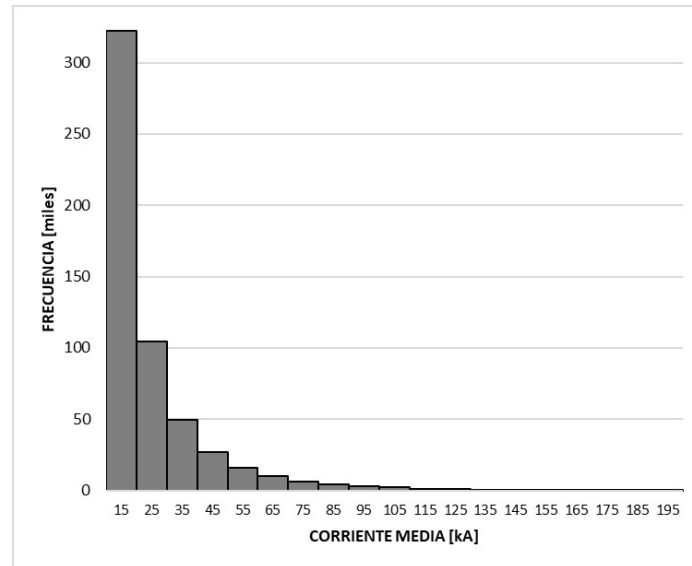
La Figura 7 muestra el histograma de corrientes pico de descarga de retorno para los flashes entre 2014 y 2016 con corrientes mayores a 10 kA, esto con el fin de comparar los resultados con los hallados en [7]. Las marcas de clase corresponden a la corriente media de cada intervalo. Se tiene que el 58,7 % de los flashes presentó corrientes pico entre 10 y 20 kA, el 19 % entre 20 y 30 kA, el 9 % entre 30 y 40 kA, y el 4,9 % entre 40 y 50 kA. Flashes con corriente de descarga de retorno mayores a 50 kA se presentaron en un 8,3 %. Así mismo, los valores máximos de corriente registrados corresponden a seis flashes con picos entre 305,3 y 345,1 kA.

### 3.5. Densidad de descargas a tierra en Santander (DDT)

En la Figura 8 se ilustra el mapa de la densidad de descargas a tierra en el departamento de Santander de los años 2014 a 2016, la cual se obtuvo de los flashes registrados por la red LINET en este periodo. En promedio en el 90 % del territorio santandereano incide al menos un rayo al año. En los tres años de estudio 549.596 flashes incidieron en el departamento de Santander.

Se evidencia que al suroriente del departamento hay una zona (comprendida por los municipios de Charalá, Gámbita, Suaita y Oiba) de altos valores de densidad de descargas a tierra que oscila entre 27 y 39 flashes/km<sup>2</sup>/año, igualmente al occidente del departamento en la mayoría de territorio de Bolívar y Cimitarra, y en una pequeña parte del municipio de La Belleza, lo que es congruente con la actividad de rayos analizada mediante el parámetro de densidad de descargas a tierra promedio, que para estos municipios varía entre 9,67 y 12,59 flashes/km<sup>2</sup>/año.

Áreas reducidas de los municipios de Sucre, El Playón, Vélez, Landázuri, Puerto Parra y Barrancabermeja presentan valores elevados de DDT como se observa en las tonalidades más oscuras de la figura en mención.



**Figura 7.** Histograma de corrientes de descarga de retorno durante el periodo de estudio

**Fuente:** Elaboración propia.

La Tabla IV muestra los diez municipios con los valores más elevados de DDT en el departamento, esto es, los recuadros con mayor incidencia de flashes al año, de los cuales cinco se ubican en el municipio de Suaita, cuatro en Gámbita, tres en Bolívar, dos en La Belleza, dos en Landázuri y uno en Oiba, Vélez, Charalá y La Paz respectivamente.

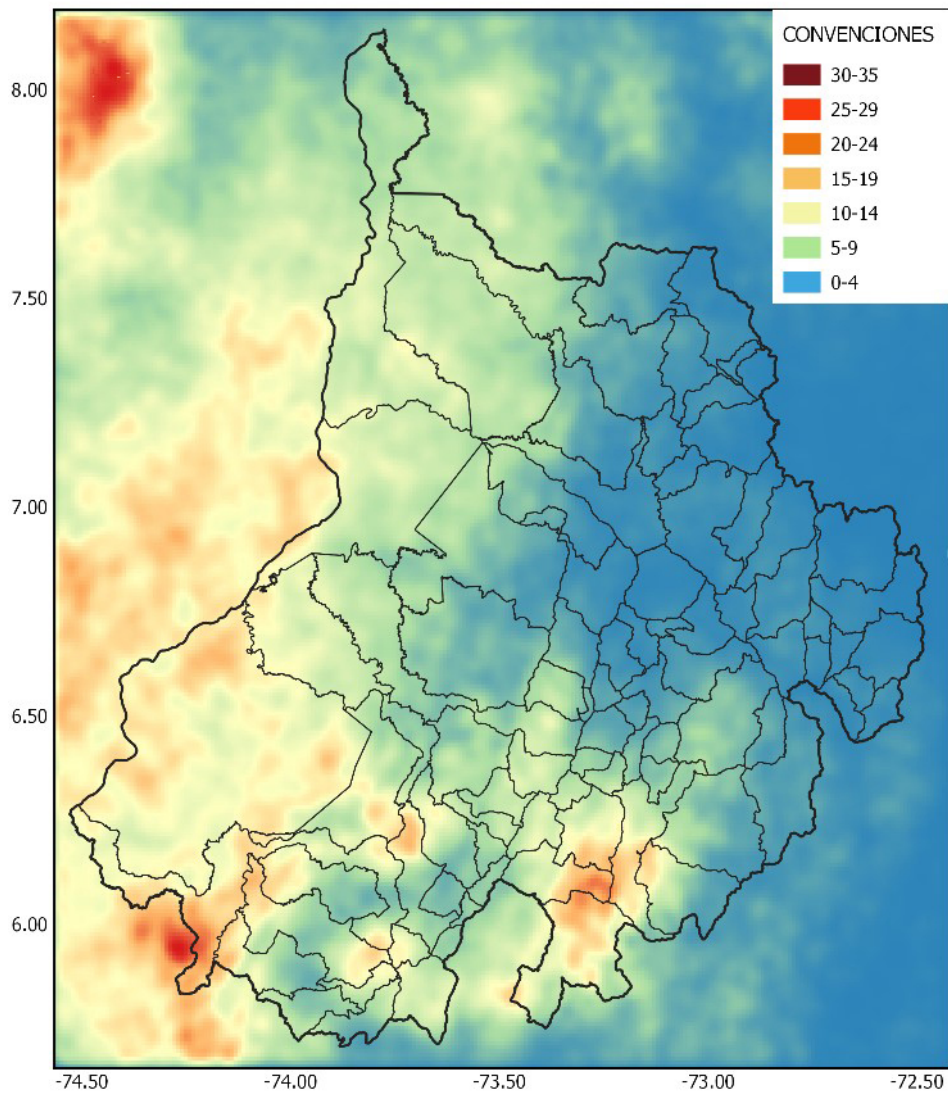
**Tabla IV.** Sitios de mayor valor de densidad de descargas a tierra en Santander

Municipio	DDT flashes/km <sup>2</sup> /año	Municipio	DDT flashes/km <sup>2</sup> /año
Suaita	39,33	Landázuri	28,67
Gámbita	30,33	La Paz	28
La belleza	30,33	Oiba	27,67
Charalá	30	Vélez	27,67
Bolívar	30	Barrancabermeja	24,67

En cuanto a valores, Suaita presenta la zona con más alta DDT del departamento con 39,33 flashes/km<sup>2</sup>/año, seguida por La Belleza y Gámbita con 30,33, Bolívar y Charalá con 30, Landázuri con 28,67, La Paz con 28, Oiba y Vélez con 27,67 y Barrancabermeja con 24,67.

Estos valores no corresponden a un año específico sino al promedio hallado en el periodo de estudio. De los nueve municipios mencionados anteriormente, seis de ellos se encuentran en la Tabla I en donde se mide la actividad de rayos, y no aparecen Landázuri, Vélez y La Paz, dado que

a pesar de que tienen zonas con elevados valores de DDT no cuentan con un promedio de flashes alto en la totalidad de su superficie, lo que si sucede con Barrancabermeja, Cimitarra y Puerto Parra.



**Figura 8.** Mapa de la densidad de descargas a tierra de los tres años de estudio

**Fuente:** Elaboración propia.

## 4. Discusión

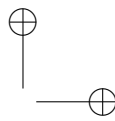
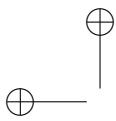
Las regiones con mayor actividad de rayos del departamento de Santander corresponden a los municipios de Bolívar, Cimitarra, Gámbita, Suaita, Oiba, La Belleza, Puerto Parra, Charalá y Barrancabermeja con valores de DDT que superan los 25 flashes/km<sup>2</sup>/año, estas zonas coinciden con las presentadas en [4] y [15] en donde se observa una marcada actividad de rayos en la zona suroeste y centro sur del departamento y se hallaron valores cercanos al valor dado. Este mismo comportamiento se evidencia también en [16] donde hay un aumento considerable en la actividad de rayos en zonas ubicadas al sureste de la región del Magdalena Medio y al suroeste de la región montañña noreste. Así mismo los resultados encontrados son congruentes con la tasa de rayos (Flash Rate Density FRD) mostrada por el sensor óptico LIS; se observa que al suroeste del departamento hay zonas con más de 50 flashes/km<sup>2</sup>/año, este último valor es mayor a los encontrados en el presente trabajo, debido a que se tienen en cuenta flashes nube-tierra, nube-nube e intra-nube [22]. Por su parte, regiones en municipios como Cerrito, Vetas, Concepción, Tona, Carcasí, Enciso, California, Capitanejo y Suratá, muestran la mínima actividad de rayos que es consecuente con los estudios nombrados en los que predomina una baja actividad de rayos en el extremo oriental del departamento y como se muestra también en [7] donde estas zonas cuentan con menos de 3 flashes/km<sup>2</sup>/año.

En cuanto a la variación temporal, se tiene que la actividad de rayos aumentó un 20 % en 2015 con respecto al año anterior y un 2,5 % en 2016 con respecto al primer año de estudio, con picos marcados en los meses de abril, mayo y septiembre de 2015 que superan los 29.000 flashes y valores máximos promedio en abril - mayo y septiembre - octubre que superan los 21.000. Este último comportamiento bimodal también se presenta en [1] en donde los meses de actividad eléctrica máxima son abril y octubre, en [7] donde para el periodo entre 1997 y 2001 los picos de actividad se registraron en mayo y septiembre y para el periodo entre 2007 y 2015 en abril y septiembre, y también en [15] con la diferencia en que el segundo pico de actividad se presenta en los meses de octubre y noviembre. Así mismo el sensor óptico LIS muestra picos de actividad en los meses de septiembre, octubre y noviembre [22].

Las franjas horarias de mayor actividad se presentan entre las 16:00 y las 18:00 h con un pico de 12.300 flashes a las 17:00 h, y entre las 23:00 y las 3:00 h con un valor máximo de 13.894 flashes a la 1:00 h, este último intervalo coincide con el pico de máxima actividad mostrado en [7], difiere con [15] en donde la máxima actividad se mantiene entre las 17:00 y las 2:00 h y es congruente con datos mostrados por el sensor óptico LIS donde predomina la actividad nocturna [22]. De igual manera, hay una variación en la hora de actividad pico en regiones de Cundinamarca, Valle del Cauca y Antioquia, donde según [1] se presenta a las 15:30 hora local; esta diferencia, según el autor, se explica dado que en zonas del Magdalena Medio son más frecuentes las precipitaciones con rayos en la noche y de madrugada. Entre las 8:00 y las 13:00 h se reduce al mínimo la actividad con menos de 2.000 flashes promedio por hora, lo que coincide exactamente con los resultados en [15].

El 76,49 % de los flashes registrados son de polaridad negativa y el 23,51 % positivos, estos valores son similares a los hallados en [7] donde el porcentaje anual es en promedio de 74,04 % para flashes negativos y 25,95 % para flashes positivos. El comportamiento encontrado es similar al de regiones de Antioquia y Caldas en donde los flashes negativos corresponden al 73,7 % y 76,9 %,





y menor al de regiones de Cundinamarca y Atlántico con 89,9 % y 84,2 % respectivamente, según polaridades promedio multianuales presentadas en [23].

De los flashes negativos el 14 % presenta más de cuatro descargas subsecuentes, mientras que solo el 6 % de los flashes positivos presenta esta misma característica. El 54,1 % de los flashes anuales promedio tiene multiplicidad igual a uno y el 87,6 % menos de cuatro, estos porcentajes son más bajos a los presentados en [15], que corresponden al 66 % y 91 % respectivamente, lo que indica que en el departamento de Santander es más frecuente que se presenten flashes con más de cuatro descargas subsecuentes.

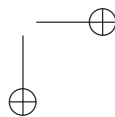
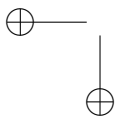
Se obtuvo una media anual de corriente pico de descarga de retorno para flashes negativos de 33,61 kA con máximos en octubre, noviembre y diciembre, y de 25,96 kA para flashes positivos con valores máximos en abril, octubre y noviembre, estas medias son mayores a las encontradas en [7] para el periodo entre 1997 y 2001 con valores de 32,11 kA y 20,20 kA respectivamente y para los flashes positivos en el periodo entre 2007 y 2015, cuya media anual es 18 kA, en este último intervalo la media para flashes negativos fue mayor a la encontrada en el presente estudio y tomó un valor de 36,18 kA. Se tiene que el 97,6 % de flashes positivos tienen corrientes pico menores a 50 kA lo que es congruente con [7].

## 5. Conclusiones

En el departamento de Santander es más frecuente que los rayos tengan corrientes pico de descarga de retorno menores a 20 kA, lo que indica que los sistemas de protección contra rayos se deben dimensionar no solo para evitar daños causados por corrientes grandes sino para proteger también de estas corrientes menores. Esto es primordial al momento de escoger el nivel de protección contra rayos y determinar el radio de la esfera rodante en los diseños de sistemas de captación. Así mismo, se obtuvo un máximo promedio de corriente pico de descarga de retorno de 38,3 kA en el mes de noviembre.

El mapa de DDT presentado permite evaluar con exactitud el indicador de exposición y consigo el nivel de riesgo ante impactos de rayo en estructuras elevadas a ubicar en cualquier punto del departamento. Lo anterior es de trascendencia en la implementación de sistemas de protección contra rayos y en acciones que permitan disminuir el riesgo de daños y pérdidas humanas causadas por descargas atmosféricas.

Se encontró una marcada influencia de la topografía del terreno y de la altitud en la incidencia de descargas atmosféricas en el departamento, ya que los municipios con mayor actividad de rayos se ubican a los costados de cadenas montañosas a alturas menores a 1.500 msnm y los municipios de menor actividad se sitúan sobre páramos y cerros a alturas entre 3.000 y 3.500 msnm. Muestra de ello es que los municipios de Suaita, Gámbita, Charalá, La Belleza y Bolívar, los cuales se ubican en los flancos de la Serranía de los Yariguíes y del Páramo Carnicerías de Guanque, presentan los sitios con mayor densidad de descargas a tierra con variaciones entre 30 y 39,33 flashes/km<sup>2</sup>/año, así mismo, en la mayoría del territorio de los municipios ubicados en el costado oriental del departamento sobre el Alto del Peñón, el Páramo El Almorzadero y el Páramo Anagá se presentan los





menores valores de DDT, lo que es congruente con el parámetro de densidad de descargas a tierra promedio.

Como trabajos futuros, entendiendo la dependencia geográfica encontrada en el departamento, se plantea estudiar las variaciones temporales de parámetros como las corrientes de pico, la polaridad, la multiplicidad a través de análisis meteorológicos y climáticos. Así mismo, determinar la influencia de las alturas de los centros de carga en nubes de tormenta en la determinación de los parámetros nombrados anteriormente.

## Referencias

- [1] H. Torres-Sánchez, *El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología*, Universidad Nacional de Colombia, 2002. ↑ 420, 421, 432
- [2] V. A. Rakov, and M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003. ↑ 420
- [3] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, "Where are the lightning hotspots on earth?", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 97, no. 11, pp. 2051-2068, 2016. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1> ↑ 420
- [4] D. Aranguren, J. López, J. Inampué, H. Torres, and H. D. Betz, "Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography", *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, vol. 154, pp. 182-189, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.010> ↑ 420, 422, 432
- [5] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montaña, and J. Herrera, "Contribution to lightning parameters study based on some American tropical regions observations", *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 8, no. 8, pp. 4086-4093, 2015. ↑ 420
- [6] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montana, and J. Herrera, "Review of ground flash density and keraunic levels reported in tropical regions" *Asia-Pacific International Conference on Lightning*, 2015. ↑ 420
- [7] J. Herrera, C. Younes, and L. Porras, "Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data", *Atmos. Res.*, vol. 203, pp. 164-174, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.009> ↑ 420, 421, 422, 429, 432, 433
- [8] H. Torres-Sánchez, "¿Qué rayos sabemos?", *RACCEFYN*, vol. 34, no. 131, pp. 193- 208, 2010. ↑ 420
- [9] K. Berger, "Blitzforschung und Personen- Blitzschutz", *ETZ(A)*, vol. 92, pp. 508-511, 1971. ↑ 420
- [10] H. Torres-Sánchez, "La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo", *RACCEFYN*, vol.41, no. 159, pp. 174-186. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.475> ↑ 420
- [11] D. F. Del Río Trujillo, *Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso colombiano* [Trabajo de grado - Doctorado], 2018. [En línea] <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63293/93061400.2018.pdf> ↑ 421, 423
- [12] J. Inampué et al., "Analysis of lightning forecasts in Colombia based on the lightning detection network data" *Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, 2009. ↑ 421
- [13] J. D. Pulgarín-Rivera, C. Younes, and M. Vargas, "Evaluation of a first return stroke model considering the lightning channel tortuosity", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 113, pp. 25-29, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.02.029> ↑ 421, 426
- [14] J. A. López et al., "Charge structure of two tropical thunderstorms in Colombia", *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 124, no. 24, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD029188> ↑ 421
- [15] H. D. Aranguren et al., "Colombian total lightning detection network and early detection of failure risks for power systems", *SICEL VII*, pp. 1-6, 2013. ↑ 422, 424, 425, 427, 432, 433
- [16] A. S. Cruz Bernal, *Evaluación del riesgo de rayos para Colombia*, Universidad Nacional de Colombia, 2019. ↑ 422, 427, 432
- [17] H. D. Betz, K. Schmidt, P. Oettinger, and M. Wirz, "Lightning detection with 3-D discrimination of intracloud and cloud-to-ground discharges", *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, no. 11, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004GL019821> ↑ 423
- [18] H. Betz, K. Schmidt, B. Fuchs, W. Oettinger, and H. Höller, "Cloud lightning: Detection and utilization for total lightning measured in the VLF/LF regime", *J. Light. Res.*, vol. 2, 2007. ↑ 423

- [19] H. D. Betz et al., "LINET-An international lightning detection network in Europe", *Atmos. Res.*, vol. 91, no. 2-4, pp. 564-573, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.012> ↑423
- [20] H. Holler et al., "Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany", *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, no. 20, 2009. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7795-2009> ↑423
- [21] M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*. Cambridge University Press, 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511585890> ↑
- [22] K. A. Velandia, *Identificación y análisis de los sitios con mayor actividad de rayos en el departamento de Santander* [Trabajo de grado], Universidad Industrial de Santander, 2018. ↑424, 432
- [23] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, "Where are the lightning hotspots on earth?", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 97, no. 11, pp. 2051-2068, 2016. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1> ↑433
- [24] ICONTEC, "NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos)", 2008. ↑

---

### Brandon Steven Ardila Murillo

Ingeniero Electricista y estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Miembro del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Bucaramanga, Colombia.  
Correo electrónico: brandon2208141@correo.uis.edu.co

---

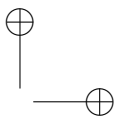
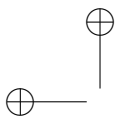
### Edison Andrés Soto Ríos

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería - Línea Automática de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Miembro del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.  
Correo electrónico: easotor@uis.edu.co

---

### Kevin Alberto Velandia

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander. Desarrolla actividades relacionadas con el diseño y la construcción de instalaciones eléctricas en media y baja tensión. Bucaramanga, Colombia.  
Correo electrónico: kevinvelandia@uis.edu.co



## Research

**Proposal of a Dynamic Algorithm for the Maintenance and Vehicle Routing Problem with Time Windows**

*Propuesta de un algoritmo dinámico para el problema de mantenimiento y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo*

**Carlos Andrés López-Ayala**<sup>1</sup>, **Wilson Jurado-Valbuena**<sup>1</sup>, **Eduyn R. López-Santana**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

caalopeza@correo.udistrital.edu.co, wjuradov@correo.udistrital.edu.co, erlopezs@udistrital.edu.co

Recibido: 15/08/2021. Modificado: 27/08/2021. Aceptado: 15/09/2021.

**Abstract**

**Context:** In the context of business organizations, every process in which the product is immersed has a cost and time associated with it. The area of maintenance planning and scheduling is no exception; however, it is an aspect in which few companies specialize, tending to be outsourced. In this sense, the application of combinatorial models is a tool with a high potential to improve the overall performance of the organization through the understanding of the integral maintenance process.

**Method:** A two-phase (maintenance and routing) dynamic algorithm is proposed which considers a set of clients distributed in a maintenance network (distance), where each of the technicians start from the same central node (depot), which, in turn, is the endpoint of each assigned route. The objective is to minimize the total cost associated with the development of preventive and corrective maintenance of all machines to be evaluated. With this purpose, the formulation of the mathematical problem for each of the phases and its interrelation method is proposed. Then, performance measures are expressed to evaluate the achieved objectives.

**Results:** The results satisfy a consistent alternative for the resolution of problems of the NP-Hard type, which generates a high level of complexity to the model. That is, it proposes a tool for solving problems of these characteristics in low computational response times and with appealing results.

**Conclusions:** The combined maintenance and routing model using a dynamic algorithm addresses the maintenance and routing problem satisfactorily. The model shows good results with respect to the comparison optimization model in percentage gaps of performance measures lower than 5%. As for the computational time required, a reduction of up to 98% was achieved, which makes it an ideal alternative for highly complex scenarios. Finally, achieving a higher level of characterization, employing multi-objective decision criteria and a greater number of constraints to the problem, is proposed in future research.

**Keywords:** maintenance, dynamic algorithm, vehicle routing, computational efficiency

**Acknowledgments:** To the High-Performance Computing Center (CECAD - *Centro de computación de Alto Desempeño*) of Universidad Distrital Francisco José de Caldas for their support, as well as for providing us with a virtual machine to run the proposed mathematical model, which was an essential element in the results obtained.

**Language:** English

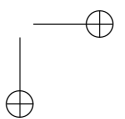
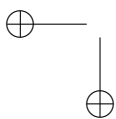
## Open access



Cite this paper as: C. A. Lopez, W. Jurado., E. López-Santana, "Proposal of a Dynamic Algorithm for the Maintenance and Vehicle Routing Problem with Time Window," INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 436:449.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.18482>



### Resumen

**Contexto:** En el contexto de las organizaciones empresariales, todo proceso en el que está inmerso el producto conlleva un costo y un tiempo asociados. El área de planeación y programación de mantenimiento no es la excepción; sin embargo, es un aspecto en el cual pocas compañías se especializan, tendiendo a la tercerización. En este sentido, la aplicación de modelos combinatorios es una herramienta con un alto potencial de mejorar el desempeño global de la organización a través del entendimiento del proceso integral de mantenimiento.

**Método:** Se plantea un algoritmo dinámico de dos fases (mantenimiento y ruteo) que considera un conjunto de clientes distribuidos en una red de mantenimiento (distancia) en el que cada uno de los técnicos parte del mismo nodo central (depósito), que a su vez es el punto final de cada ruta asignada. El objetivo consiste en minimizar el costo total asociado al desarrollo del mantenimiento tanto preventivo como correctivo de todas las máquinas a evaluar. Con esta finalidad se plantea la formulación del problema matemático para cada una de las fases y su método de interrelación. Después se expresan medidas de desempeño para evaluar los objetivos alcanzados.

**Resultados:** Los resultados satisfacen una alternativa consistente para la resolución de problemas del tipo *NP-Hard* que genera un alto nivel de complejidad al modelo. Es decir, plantea una herramienta para resolución de problemas de estas características en tiempos de respuesta computacional reducidos y con resultados atractivos.

**Conclusiones:** El modelo de mantenimiento y ruteo combinado usando un algoritmo dinámico permite abordar el problema de mantenimiento y ruteo de manera satisfactoria. El modelo presenta buenos resultados frente al modelo de optimización de comparación en brechas porcentuales de medidas de desempeño inferiores al 5%. Respecto al tiempo computacional requerido, se logró una reducción de hasta el 98%, lo cual lo convierte en una alternativa ideal para escenarios de gran complejidad. Finalmente, se propone en futuras investigaciones alcanzar un mayor nivel de caracterización por medio de criterios de decisión multiobjetivo y un mayor número de restricciones al problema.

**Palabras clave:** mantenimiento, algoritmo dinámico, ruteo de vehículos, eficiencia computacional

**Agradecimientos:** Al Centro para Computación de Alto Desempeño (CECAD) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en su gestión y apoyo para el préstamo de la máquina virtual en la ejecución del modelo matemático planteado, como elemento esencial en los resultados alcanzados.

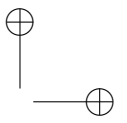
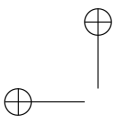
**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

In the context of large organizations in the 21<sup>st</sup> century, market dynamics and the volatility of operating conditions generate such a level of uncertainty that it is pertinent to manage it through solutions that enable agile and consistent decision-making. In this sense, business organizations have begun to use the definition of VUCA (volatility, uncertainty, complexity, ambiguity) environments to respond to the challenges posed by competitiveness in different sectors [1].

Growing market challenges lead industries to turn to mathematical modeling and other tools that enable them to effectively manage organizational resources, as well as to meet customer requirements, in other words, solutions that are relevant from both a cost (financial) and niche market (commercial) capture and conversion perspectives.

From this approach, the proposed solution arises for the vehicle routing problem with soft periodic time windows (VRPSPTW) or vehicle routing problem with soft multiple time windows



(VRPSMTW). This approach responds to a two-phase iterative method for the processes of replacement, maintenance, and scheduling of customer visits. The above, through the use of integer linear programming (MILP) and the presentation of a dynamic algorithm as a research extension to the work proposed by [2], which provides shorter response times and a similar level of efficiency in the comparison between both models.

This paper focuses on the combinatorial model of maintenance and routing with time windows (CMR). The paper is organized as follows: section 2 details the literature review; section 3 proposes the two-phase mathematical model; section 4 shows the comparison results with a literature model; and section 5 presents the conclusions in detail.

## 2. Literature review

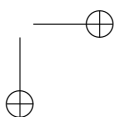
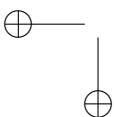
Within the reviewed works, an extensive compendium of authors detailing models and approaches to maintenance models was found [3]–[6]. The scenario against vehicle routing models (VRP), in a general understanding and through extensions such as time windows (VRPTW), is described repeatedly by different authors [7]–[9]. For more complex cases, some researchers have proposed solutions from constructive heuristics [10], [11], up to hybrid methods that combine modeling to a metaheuristic character [12].

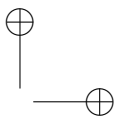
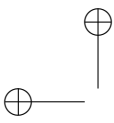
Regardless of the above, it should be clarified that the integration of routing problems with maintenance is limited, and very little work has been done on this line of development [13].

Given this combinatorial scenario, [14] postulates a mathematical model that defines the transportation fleet scheduling problem (TFMSP), which consists of determining the frequency of maintenance for the vehicles of a specific company. In [15], an extension model of the TFMSP is proposed for a service provider that performs logistics processes by branches, demonstrating that there are significant savings based on the coordination of maintenance between branches. For the first time in the new decade, [16] proposes applicability to the problem of assigning technicians who are responsible for a set of elevators and escalators that are geographically distributed throughout a shopping mall. With [17], an optimal methodology for the maintenance of a heavy vehicle is developed while considering a whole multi-component system.

Recently, [2] conducted a two-phase scheduling model that addresses the scenario of machines that require maintenance planning but are geographically distributed. This model contemplates two mutually recurring phases, which consist of a model of both corrective and preventive maintenance during a given planning horizon, defining maintenance time windows for each visit.

An optimization model for maintenance routing and scheduling is proposed for the applied case of an offshore wind farm. It is determined according to the maintenance operations and the optimal transfer vessel routes in association with the number of technicians who carry out the maintenance [18].





Similarly, a preventive maintenance policy has been generated for the vehicles to be delivered by the client or set of clients according to the distance traveled and other external variables [19].

However, in some sectors of the sewerage systems industry, only a few authors have carried out research on the subject [20]. Among the contributions that should be mentioned is [21], which deals with the problem related to the maintenance of gully pots in the United Kingdom. This solution consists of simulating the schedule generated through routes that minimize the traveled distance, a difference compared to other models that focus on the economic aspect, just like [2] in its process of applicability to the oil and gas industry.

Finally, routing and scheduling models for technicians have been postulated. In this case, it is assumed that they are qualified in various skills to carry out equipment assignments concerning scheduled maintenance operations [22].

In conclusion, significant progress has been made in this type of combinatorial problem, where the need to unify maintenance and routing in a single general problem is perceived. In detail, most of the contributions are based on a set of parameterized input data that allow simplifying the problem down to a VRPTW level only.

### 3. Proposed mathematical model

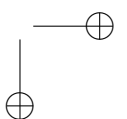
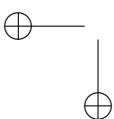
The expected failure time in the maintenance process has a probabilistic behavior, which makes the problem stochastic. This implies an iterative, recurrent, and complex problem when it comes to defining the maintenance routine under feasible time windows. In this research, a two-stage combinatorial algorithm is proposed for its solution: in its first stage, the optimal start time and the cost per unit of maintenance time are mainly obtained, information that is later used in the second stage to perform the routing of the technicians who perform maintenance for the customers within the planning horizon. Once the visits to the customers have been assigned in the second stage, the input information of the first stage is complemented by obtaining the waiting time if the breakdown occurs, so that the maintenance and routing cycle is performed iteratively by defining a stop criterion for its completion. The variables used in the proposed model for the solution of the combinatorial problem are detailed in Table I below.

#### 3.1. Phase I

This phase corresponds to the maintenance model, which needs an input information of the failure behavior of the machines and their related costs. The objective is to find the optimal maintenance start time that generates the lowest cost per unit time, as well as the time windows for each of the customers [2].

$$F(\delta) = P(T \leq \delta) = \int_0^{\delta} f(d) dt \quad (1)$$

$$E[t(\delta)] = (\delta + T_{PM})(1 - F(\delta)) + (M(\delta) + w + T_{CM})F(\delta) \quad (2)$$



**Table I.** Model variables

Constants			
$T_{PM}$	Time to PM	$\tau$	Planning horizon
$T_{CM}$	Time to CM	$C_w$	Cost of machine downtime
$C_{PM}$	Cost of performing a PM	$C_{CM}$	Cost when performing a CM
$t_{ij}$	Travel time from node $i$ to node $j$	$\Delta \cos t$	Maximum allowable incremental cost for the timewindow
Sets			
$M$	Set of customers	$N$	Set of operations
$A$	Set of indexed arcs in $\{i, j\}$	$K$	Set of technicians indexed in $k$
$V_M$	Customer's set of operations $M$		
Parameters			
$PM$	Preventive maintenance	$CM$	Corrective maintenance
$\delta^+$	Optimal preventive visit time	$S_{ij}$	Maintenance start time at $j$ coming from $i$
$e$	Lower maintenance start limit	$l$	Upper limit of maintenance start
$f(T)$	Probability density function of $T$	$T$	Random variable of failure
$E[T(\delta)]$	Total cycle time	$M(\delta)$	Average failure time of $\delta$
$\cos t_{ij}$	Cumulative cost of performing maintenance on $j$ coming from $i$	$r_i$	Completion time of the last maintenance performed on the same machine
$MR$	Matrix of the routes to each node	$R$	Maintenance completion time matrix for all RM routes
$S$	Matrix of maintenance initiations for all RM routes	$th_i$	Slack time that the technician has at node $i$
$tII_{ij}$	Arrival time at node $j$ with technician coming from node $i$	$C(\delta)$	Maintenance cost at $j$ for starting maintenance at $s_{ij}$
$M(\delta)$	Average time to failure if it occurs before $\delta$	$F(\delta)$	Probability of machine failure over time $\delta$
Performance indicators			
$\bar{F}_1$	Average failure probability per customer	$\bar{C}_1$	Average cost per unit of time per customer
$\bar{W}_1$	Average waiting time per customer		

$$C(\delta) = \frac{C_{PM}(1 - F(\delta)) + (C_{CM} + w \cdot C_w)F(\delta)}{E[T(\delta)]} \quad (3)$$

$$M(\delta) = \int_0^{\delta} \frac{tf(t)}{D(\delta)} dt \quad (4)$$

$$w = s - \int_0^s \frac{tf(t)}{F(s)} dt \quad (5)$$

In this phase, the cumulative probability of failure before  $\delta$  is found, using the failure probability function that characterizes the customer's machine, which is expressed in Equation (1). This cumulative probability allows calculating the maintenance cycle, be it preventive or corrective, through Equation (2), as well as the cost per unit of time to perform the maintenance in  $\delta$  via Equation (3), using the average time to failure in Equation (4) and the average waiting time of a  $CM$  in Equation (5). The second phase needs the  $\delta^*$  information that minimizes the cost function curve,  $C(\delta)$ ,

and allows finding the time window,  $\{e, l\}$ , which is obtained as the maintenance start times that increase the cost in units,  $\Delta \text{cost}$ . Finally, the maintenance model is run in the same way for each of the customers, thus obtaining all the equations of  $\text{cost}$ , optimal start time, and time windows.

Fig. 1 shows an example of the maintenance cycles and their linkage to cost per unit time. The first cycle shown is preventive maintenance, and it is identified by starting maintenance at time  $\delta^*$  without a failure in the machine. It then minimizes the maintenance cost curve per unit of time. Preventive maintenance ends at time  $\delta^* + T_{PM}$ . The next cycle is corrective maintenance, and it is identified at the occurrence of the failure in time  $X$  prior to  $\delta^*$ , according to the expected failure time.  $w$  units of time from failure to the start of maintenance  $\delta$  are expected. Corrective maintenance ends at time  $\delta^* + T_{PM} + M(\delta) + w + T_{CM}$ . Finally, the last cycle details the time window obtained for the customer with the maximum allowable increase,  $\Delta \text{cost}$ .

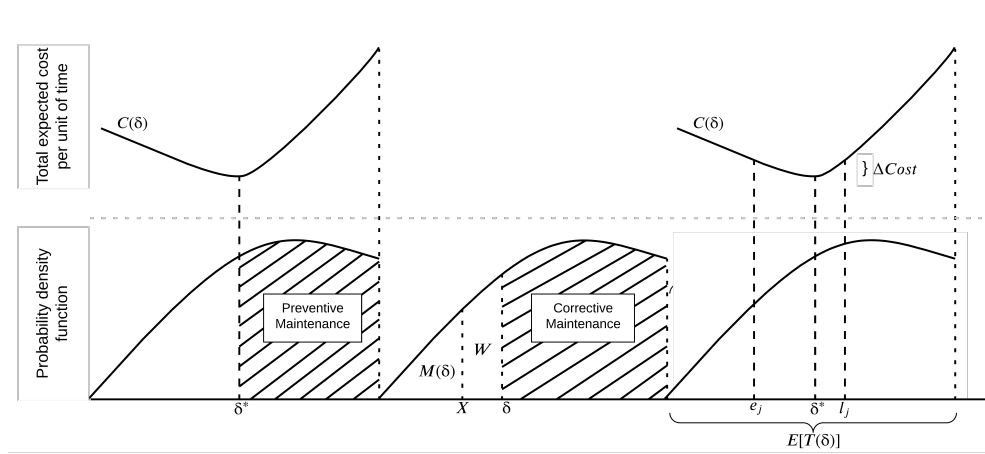


Figure 1. Example of a machine maintenance cycle

### 3.2. Phase II

This phase corresponds to the routing of technicians to perform maintenance according to the information obtained in phase I and the initial data of the clients. The available technicians are scheduled to attend in the time windows while considering the transport times between customers. The output of this phase provides the average waiting time, the probability of failure, and the total cost per unit of time for each of the customers, as well as the assignment of technicians to the visits and the maintenance start times,  $s_j$ . The idea of routing is to minimize the total cost per unit time for performing the maintenance assigned to a technician.

$$tll_{ij} = r_{i+n} + t_{ij} \quad \{i, j\} \in A \quad (6)$$

$$S_{ij} = \delta_j^* \quad \{i, j\} \in A \quad (7)$$



$$\min f(x) = C_i(s_i - x) + C_j(s_{ij} - x) \quad x \in [0, \min(th_i, s_{ij} - \delta_j^*)] \quad (8)$$

$$th_i = s_i - \max(e_i, tll_i) \quad \{i, j\} \in A \quad (9)$$

$$\cos t_{ij} = \cos t_i + C_j(s_{ij}), \{i, j\} \in A \quad \{i, j\} \in A \quad (10)$$

$$r_{j+n} = s_j + T_{PM_j}(1 - F_j(s_j - r_j)) + T_{CM_j}F_j(s_j - r_j) \quad \{j, j+n\} \in V \quad (11)$$

$$\delta_{j+n}^* = r_{j+n} + \delta_{M \in (j+n)}^* \quad \{j, j+1\} \in V \quad (12)$$

$$r_{i+n} + t_{ij} \leq l_j \quad \{i, j\} \in A \quad (13)$$

The routing problem consists of  $K$  technicians and  $M$  customers, with 1 or more visits within the planning horizon. For its solution, a dynamic algorithm is proposed, which performs the routing of the technicians jointly, assigning the visit,  $i$ , of the customers to the technician,  $k$ , and giving the necessary information for the next customer visit within the planning horizon. The dynamic algorithm starts from dispatch to the return of each technician. Stage  $t$  consists of the arcs,  $A_{ij}$ , where  $j$  represents the node with the closest maintenance start that can be performed in its time window by any of the technicians, who are assigned to perform maintenance at nodes  $i$ .

For each technician at  $i$ , the arrival time,  $tll_{ij}$ , is calculated through Equation (6) and compared to the optimal start time,  $\delta_j^*$ . If this  $tll_{ij}$  occurs before the maintenance start,  $\delta_j^*$ , the optimal start time is assigned to  $s_{ij}$ , which is expressed in Equation (7). Otherwise, the deviation adjustment is performed to generate the lowest cost overrun by finding the one  $s_{ij}$  that minimizes the cost function at  $i$  and  $j$  by means of Equation (8). The deviation adjustment obtains the lowest total cost by starting maintenance earlier at  $i$ , delaying the start of maintenance by  $x$  units of time, bounded by the minimum between the slack time,  $th_i$ , of node  $i$ , which is expressed in Equation (9), and the difference between  $tll_{ij}$  and  $\delta_j^*$ . If the slack adjustment was made to the technician chosen to perform maintenance at  $j$ , it is necessary to update the values of  $s_i$ ,  $r_{i+n}$ ,  $th_i$ , and  $\cos t_i$ . Once all the  $s_{ij}$  are obtained, the  $\cos t_{ij}$  are calculated with Equation (10), and the  $A_{ij}$  with the lowest cumulative cost is chosen.

With the information from node  $j$ , the maintenance completion time  $r_{j+n}$  in Equation (11) and the slack time,  $th_j$ , are calculated through Equation (9). The next visit of customer  $j+n$  is added if the technician can return to the office after performing maintenance within the planning horizon by assigning in  $\delta_{j+n}^*$  in Equation (12) and its time window  $[e_{j+n}, l_{j+n}]$ . To start stage  $t+1$ , the unassigned visit with the nearest  $\delta^*$  is selected and designated as node  $j$ , which represents technicians that can perform maintenance at  $j$  without exceeding  $l_j$ , as expressed by Equation (13). The dynamic algorithm terminates when there are no unassigned visits in the planning horizon and the return to dispatch is added for each of the technicians.

The pseudocode 1 of the two-phase model for the solution of customer maintenance and routing is described below.

**Algorithm 1** Maintenance and routing model with time windows

---

```

1. While Criterionstop
2.   For  $i$  in customers
3.      $F_i(\delta) = \int_0^\delta f(t) dt$ 
4.      $w = s - \int_0^s \frac{tf(t)}{F(s)} dt$  If  $s \exists$  Else 0
5.      $E_i[T(\delta)] = (\delta + T_{PM})(1 - F(\delta)) + (M(\delta) + w + T_{CM})F(\delta)$ 
6.      $C_i(\delta) = \frac{C_{PM}(1-F(\delta)) + (C_{CM} + w \cdot C_w)F(\delta)}{E[T(\delta)]}$ 
7.      $\delta^* = \delta$  than  $\min C_i(\delta)$ 
8.      $e_i = e$  than  $(C(e) \text{ equal } C(\delta^*) - \Delta cost)$ 
9.      $l_i = l$  than  $(C(l) \text{ equal } C(\delta^*) + \Delta cost)$ 
10.  End For
11.  nodes = 1 to  $N$ ;  $r_i = 0 \forall N$  Stage = 1
12.  While size(nodes) > 0
13.     $j$  with  $\min\{\delta_j^*\}$ 
14.    New Arches  $A_{ij}$ 
15.    For  $A_{ij}$ 
16.       $s_{ij} = \max\{\delta_j^*, r_{i+n} + t_{ij}\}$ 
17.      If  $s_{ij} \leq \delta_j^*$ 
18.         $Cost_{ij} = Cost_i + C_j(s_{ij})$ 
19.      Else If  $s_{ij} \leq l_j$ 
20.         $[s_i, s_{ij}] = [s_i - x, s_{ij} - x]$  with  $x$  than  $\min f(x) = C_i(s_i - x) + C_j(s_{ij} - x)$ 
21.      End If
22.    End For
23.     $i$  with  $\min\{Cost_{ij}\}$ 
24.     $r_{j+n} = s_j + T_{PM_j}(1 - F_j(s_j - r_j)) + T_{CM_j}F_j(s_j - r_j)$ 
25.    Update Routing $k$ ,  $S_j$ ,  $R_j$ 
26.     $j + n$  If  $l_{j+n} \leq \tau$ 
27.    Delete  $j$  in nodes
28.    Stage += 1
29.  End While
30.  For  $i$  in  $V_c$  Calculate  $\bar{C}_i, \bar{W}_i, \bar{F}_i, FO_Q$ 
31. End While

```

---

## 4. Experimentation

A comparison was made with the model proposed in [2] by using a replica, verifying the performance measures and the computational time required for its solution. In this comparison, the random instances of the model were used, which are an extension of those defined in [23], thus extending the planning horizon to 200 time units.

### 4.1. Comparison of models

For the comparison, a total of 900 tests were performed, which were divided homogeneously among 9 sets of clients, where, for each test, the same initial data were evaluated on the proposed model and on the replica of the comparison model. The evaluation of the two models was per-

formed on a computer provided by the Centro para Computación de Alto Desempeño (Center for High-Performance Computing, CECAD) of Universidad Distrital with 16 CPU processors and 32 GB of RAM, running on the Ubuntu 20.04.1 LTS 64-bit operating system, where a program in the MATLAB language was made, and GUROBI was used for its great performance solving MILP-type problems and its integration with MATLAB [24], [25].

These results were averaged across each of the client sets, where a trend in the behavior of the performance measures and computational time was found. This is shown in Table II.

**Table II.** Average performance measures of the 100 runs for the clients sets

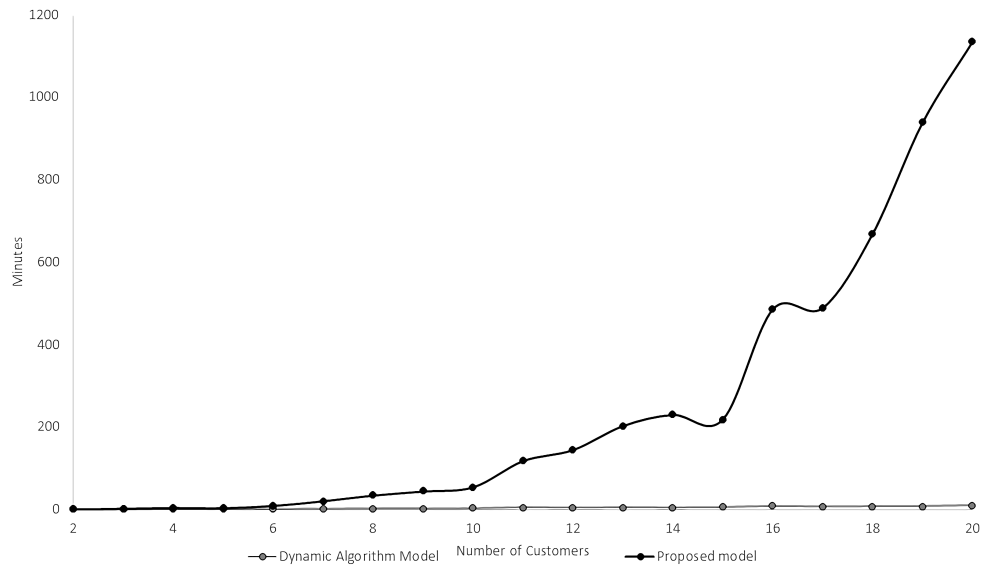
Customer Set	$\sum C_i(\$)$		$\sum W_i(s)$		$\sum F_i$		Number of nodes
	Proposed Model	Model Comparison	Proposed Model	Model Comparison	Proposed Model	Model Comparison	
2	7,147	7,112	8,195	7,895	8,56 %	7,74 %	7,55
3	10,385	10,301	8,681	8,303	8,83 %	7,74 %	10,27
4	14,389	14,266	8,361	8,048	9,11 %	7,91 %	13,41
5	16,983	16,933	8,087	7,812	8,06 %	7,36 %	15,31
6	20,939	20,720	8,641	8,244	9,38 %	8,01 %	18,64
7	24,879	24,730	8,658	8,254	9,11 %	8,17 %	21,95
8	28,863	28,548	8,624	8,269	9,68 %	8,30 %	24,56
9	32,087	31,858	8,809	8,394	9,20 %	8,01 %	27,44
10	35,698	35,513	8,554	8,150	9,45 %	8,33 %	29,36
Difference	0,731 %		4,417 %		1,087 %		

The results show the same behavior among the sets of customers; the use of the dynamic algorithm for the routing solution in the combinatorial problem of maintenance and routing does not present a considerable decrease in the performance measures, where the cost per unit of time is 0,731 % higher, the average waiting time is 4,417 % higher, and the probability of failure is 1,087 % higher.

## 4.2. Comparison of computational time

The computational time comparison required 1.700 tests distributed among 19 sets of clients, using the previously specified instances and the MATLAB Profile function. A limit of 20 clients was reached in the comparison model for computational requirements. These results were plotted and are shown in Fig. 2.

The average computational time required by the proposed model shows a linear behavior as the number of clients increases, with the highest average computational time of 10,4 minutes in the set of 20 clients. The highest average computational time of 1.135,5 minutes for the set of 20 clients.



**Figure 2.** Average computational processing time: time required by the comparison model and the proposed model for the 1.700 results

### 4.3. Proposed model performance

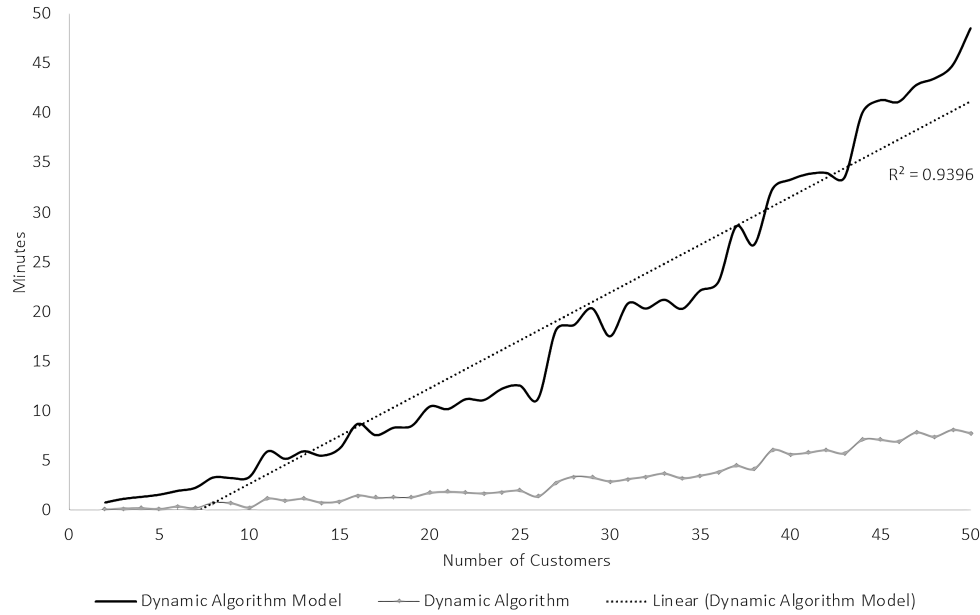
Tests were performed on the proposed model to verify its behavior with sets of up to 50 customers. At least 25 tests were performed on the previously described computer for each set in order to characterize its behavior, the results of which are detailed in Fig. 3.

Fig. 3 shows the average computational time of the model with the full dynamic algorithm and the second phase separately. As it can be seen by its trend line, this model and its second phase present a linear behavior.

### 4.4. Case study

A comparison was made with the case study in the oil and gas industry proposed in [2], where daily operations involve the management of a network of interconnected pumping stations geographically distributed over a region. The stations are subject to unforeseen failures that result in an impact on times. The company has a maintenance department that serves multiple plants (with several pumping stations) scattered over a wide geographical area covering several cities.

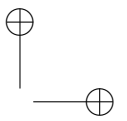
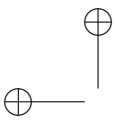
The data provided in the case study correspond to the travel time between nodes, the costs and times for performing preventive or corrective maintenance, the  $\Delta \text{cost}$  parameter, and the probability of failure function associated with the node. The results obtained from the comparison between the proposed model and the one for comparison are shown in Table III.



**Figure 3.** Average computational processing time of the comparison model and the proposed model for the 1.700 results and up to 50 customers

**Table III.** Results of the case study with the comparison between the models

Customers	$C_i$ (\$)		$W_i$ (s)		$F_i$	
	Model	Model	Model	Model	Model	Model
	Proposed	Comparison	Proposed	Comparison	Proposed	Comparison
1	4,1942	4,1940	1,4664	1,4618	1,64 %	1,60 %
2	2,5730	2,5730	1,5454	1,5414	1,13 %	1,10 %
3	5,4124	5,4110	9,8888	9,8593	19,28 %	19,13 %
4	3,4315	3,4330	12,0766	12,1453	10,32 %	10,50 %
5	4,5249	4,5250	7,2121	7,2316	8,75 %	8,82 %
6	4,4458	4,4460	1,6818	1,6886	2,73 %	2,81 %
7	3,7614	3,7600	11,2164	11,1702	13,94 %	13,77 %
8	1,4922	1,4930	2,3143	2,3466	0,70 %	0,80 %
9	2,3874	2,3870	3,2526	3,2714	2,25 %	2,35 %
10	1,5856	1,5860	2,2714	2,2490	0,85 %	0,77 %
<b>Total</b>	<b>33,8083</b>	<b>33,8090</b>	<b>5,2926</b>	<b>5,2965</b>	<b>6,16 %</b>	<b>6,17 %</b>



The computational time consumed by the models shows the same behavior previously described for the set of 10 clients. The proposed model obtained a time of 6,814 seconds against 169,41 seconds for the solution of the comparison model.

## 5. Conclusions

The combined maintenance and routing model using the dynamic algorithm helped address the CMR problem, where, during first phase, the maintenance model provides information about customer visits, and, in its second phase, it performs the assignment of those visits to the available technicians.

The proposed model shows good results compared to the optimization model presented in [2]; the total costs per unit time and waiting time do not exceed 1 and 5 %, respectively, and the probability of failure only increases by 1 % in total. These results demonstrate the feasibility of the proposed model.

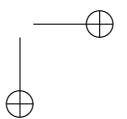
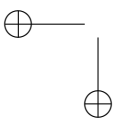
The comparison of the computational time between the models demonstrates the resource and time requirements of the optimization model when using a linear MILP approach. The proposed model showed a decrease from 53,56 % with few customers to 98,08 % with 20 customers, in addition to the few computational resources required for its solution. These results evidence decrease in the complexity of the problem with good results in terms of performance indicators.

Running the proposed two-phase model characterizes the linearity in terms of computational times, even with instances of large number of clients. The model is feasible for the execution of complex problems with a large number of customers, visits, or a long planning horizon. The case study demonstrates its feasibility in real systems, finding similar performance measures, but a computational time of only 4 %.

Future research could apply a multi-objective function in the second phase of the model, different decision-making to choose the best technician assigned to a visit and extensions of the problem with working days, and multiple dispatches of technicians, among others.

## References

- [1] O. Mack, A. Khare, A. Krämer, and T. Burgartz, *Managing in a VUCA world*, New York, NY, USA: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16889-0> ↑437
- [2] E. López-Santana, R. Akhavan-Tabatabaei, L. Dieulle, N. Labadie, and A. L. Medaglia, "On the combined maintenance and routing optimization problem," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 145, pp. 199-214, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.09.016> ↑438, 439, 443, 445, 447
- [3] J. A. Andrawus, J. Watson, and M. Kishk, "Wind Turbine Maintenance Optimisation: Principles of Quantitative Maintenance Optimisation," *Wind Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 101-110, Mar. 2007, <https://doi.org/10.1260/030952407781494467> ↑438
- [4] N. M. de Souza and A. T. de Almeida Filho, "A systematic airport runway maintenance and inspection policy based on a delay time modeling approach," *Autom. Constr.*, vol. 110, 103039, Feb. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103039> ↑438



- [5] R. Dekker, "Applications of maintenance optimization models: A review and analysis," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 51, no. 3, pp. 229-240, Mar. 1996. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00076-3) ↑438
- [6] N. Zhang, M. Fouladirad, and A. Barros, "Maintenance of a two dependent component system: a case study," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 793-798, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.871> ↑438
- [7] R. Baldacci, A. Mingozzi, and R. Roberti, "New route relaxation and pricing strategies for the vehicle routing problem," *Oper. Res.*, vol. 59, no. 5, pp. 1269-1283, Oct. 2011. <https://doi.org/10.1287/opre.1110.0975> ↑438
- [8] G. Desaulniers, "Branch-and-price-and-cut for the split-delivery vehicle routing problem with time windows," *Oper. Res.*, vol. 58, no. 1, pp. 179-192, Sep. 2010. <https://doi.org/10.1287/opre.1090.0713> ↑438
- [9] R. Fukasawa et al., "Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem," *Math. Program.*, vol. 106, pp. 491-506, Oct. 2006. <https://doi.org/10.1007/s10107-005-0644-x> ↑438
- [10] B. Afshar-Nadjafi and A. Afshar-Nadjafi, "A constructive heuristic for time-dependent multi-depot vehicle routing problem with time-windows and heterogeneous fleet," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 29, no. 1, pp. 29-34, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2014.04.007> ↑438
- [11] T. Vidal, T. G. Crainic, M. Gendreau, and C. Prins, "Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 23, no. 1, pp. 1-21, Nov. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.053> ↑438
- [12] N. Azi, M. Gendreau, and J. Y. Potvin, "An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 202, no. 3, pp. 756-763, May 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.034> ↑438
- [13] J. E. Fontecha, O. O. Guaje, D. Duque, R. Akhavan-Tabatabaei, J. P. Rodríguez, and A. L. Medaglia, "Combined maintenance and routing optimization for large-scale sewage cleaning," *Ann. Oper. Res.*, vol. 286, no. 1-2, pp. 441-474, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03342-8> ↑438
- [14] S. K. Goyal and A. Gunasekaran, "Determining economic maintenance frequency of a transport fleet," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 23, no. 4, pp. 655-659, Apr. 1992. <https://doi.org/10.1080/00207729208949239> ↑438
- [15] J. Y. Huang and M. J. Yao, "On the coordination of maintenance scheduling for transportation fleets of many branches of a logistic service provider," *Comput. Math. with Appl.*, vol. 56, no. 5, pp. 1303-1313, Sept. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.01.037> ↑438
- [16] F. Blakeley, B. Bozkaya, B. Cao, W. Hall, and J. Knolmayer, "Optimizing periodic maintenance operations for Schindler Elevator Corporation," *Interfaces (Providence)*, vol. 33, no. 1, pp. 67-79, Feb. 2003. <https://doi.org/10.1287/inte.33.1.67.12722> ↑438
- [17] K. Bouvard, S. Artus, C. Bérenguer, and V. Cocquempot, "Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. Application to commercial heavy vehicles," *rel. Eng. Sys. Saf.*, vol. 96, no. 6, pp. 601-610, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.11.009> ↑438
- [18] C. A. Irawan, R. Ouelhadj, D. Jones, M. Stålhane, and I. B. Sperstad, "Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 256, no. 1, pp. 76-89, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.05.059> ↑438
- [19] A. Troudi, S. Dellagi, and S. A. Addouche, "An optimal maintenance policy for transport vehicles in a supply chain under infrastructure/environment constraints," in *45th Int. Conf. Comp. Ind. Eng.*, Metz, France, Oct. 28-30, 2015, pp. 207. ↑439
- [20] J. E. Fontecha, R. Akhavan-Tabatabaei, D. Duque, A. L. Medaglia, M. N. Torres, and J. P. Rodríguez, "On the preventive management of sediment-related sewer blockages: A combined maintenance and routing optimization approach," *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 2, pp. 302-308, mar. 2016. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.160> ↑439
- [21] Y. Chen, P. Cowling, F. Polack, S. Remde, and P. Mourdjis, "Dynamic optimisation of preventative and corrective maintenance schedules for a large scale urban drainage system," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 257, no. 2, pp. 494-510, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.027> ↑439
- [22] E. Zamorano and R. Stolletz, "Branch-and-price approaches for the Multiperiod Technician Routing and Scheduling Problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 257, no. 1, pp. 55-68, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.058> ↑439
- [23] M. M. Solomon, "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems With Time Window Constraints," *Oper. Res.*, vol. 35, no. 2, pp. 254-265, Apr. 1987. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254> ↑443
- [24] B. Meindl and M. Templ, "Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization

- problems,” *ESSnet commom tools Harmon. Methodol. SDC ESS*, vol. 1, no. 1, pp. 1-14, Feb. 2012. <http://www.statistik.tuwien.ac.at/forschung/CS/CS-2012-1complete.pdf> ↑444
- [25] J. Jablonský, “Benchmarks for Current Linear and Mixed Integer Optimization Solvers,” *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, vol. 63, no. 6, pp. 1923-1928, Dec. 2016. <https://doi.org/10.11118/201563061923> ↑444

---

### **Carlos Andrés López-Ayala**

Bachelor’s degree in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas. He belongs to the ARCOSES research group (*Adquisición y representación de conocimiento mediante sistemas expertos y simulación*, Acquisition and representation of knowledge through expert systems and simulation).  
email: caalopeza@correo.udistrital.edu.co

---

### **Wilson Jurado-Valbuena**

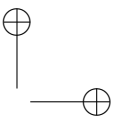
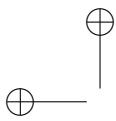
Bachelor’s degree in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas. He belongs to the ARCOSES research group (*Adquisición y representación de conocimiento mediante sistemas expertos y simulación*, Acquisition and representation of knowledge through expert systems and simulation).  
email: caalopeza@correo.udistrital.edu.co

---

### **Eduyn Ramiro López-Santana**

He is an Assistant Professor at the Engineering Department of Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Bogotá, Colombia. He obtained his bachelor’s degree on Industrial Engineering at the same university in 2009, a master’s degree on Industrial Engineering at Universidad de los Andes – Bogotá, Colombia – in 2013, as well as a Doctoral degree in engineering at Universidad Distrital Francisco José de Caldas in 2018. His main interests are combinatorial optimization, expert systems, and applications in production and logistics. He belongs to the ARCOSES research group (*Adquisición y representación de conocimiento mediante sistemas expertos y simulación*, Acquisition and representation of knowledge through expert systems and simulation).  
e-mail: erlopezs@udistrital.edu.co





Research

REVISTA  
Ingeniería

## SSOP Three-Dimensional Reconstruction of Tibia and Fibula for Applications in Biomechanical Fracture Models

*SSOP Reconstrucción tridimensional de la tibia y el peroné para su aplicación en modelos biomecánicos de fracturas*

**Valentina Mejía-Gallón\*** <sup>1</sup>, **María Camila Naranjo-Cardona** <sup>1</sup>, **Juan Atehortua Carmona** <sup>1</sup>, **Samuel Vallejo Pareja** <sup>1</sup>, **Juan Felipe Santa-Marín** <sup>1</sup>, **Viviana M. Posada** <sup>1</sup>, **Juan Ramírez** <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

\*Correspondance email: vamejiag@unal.edu.co

Recibido: 15/08/2021. Modificado: 27/08/2021. Aceptado: 15/09/2021.

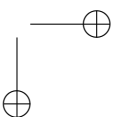
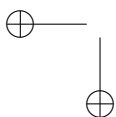
Open access



Cite this paper as: V. Mejía-Gallón *et al.*, "SSOP Three-Dimensional Reconstruction of Tibia and Fibula for Applications in Biomechanical Fracture Models", INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 450-464.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.18471>



### Abstract

**Context:** Non-fatal injuries represent a public health issue. Among them, lower limb fractures have a large impact on the costs related to orthopedic treatments. In this work, a three-dimensional reconstruction of the tibia and fibula was performed for biomechanical applications with the purpose of defining the 3D reconstruction parameters that allow reducing patients' radiation exposure and computational costs.

**Method:** For the 3D reconstruction, a computerized tomography taken from a volunteer was used, as well as two software applications specialized in DICOM image reconstruction (Mimics Research and 3DSlicer). The number of images included in the volume was modified, and the results were compared. The quality of the reconstructed volumes was verified by comparing the reference volume reconstructed with the total number of images/slices vs. the modified volumes. The MeshLab software was used for this purpose. The analyzed parameters were the distance differences between the reference and the alternative models, as well as the qualitative curvature analysis.

**Results:** The ANOVA results for the Max (maximum distance between meshes) response shows that software and slices are significant factors. However, the software-slices interaction did not have a significant influence. As for the RMS (root mean square) distance response, software, slices, and the software-slices interaction are not significant. For the Mean distance response, slices and the software-slices interaction are not significant. Nevertheless, software significantly influences the response. These results suggest a potential way to reduce the computational cost and the patient's radiation exposure in future biomechanical and preoperative analyses, since the same quality can be obtained by including fewer 2D images in the reconstruction.

**Conclusions:** The reconstructed surfaces are smoother when Mimics is used, even though the same smoothness factor was employed in both software applications during the reconstruction. When 16 slices are used (retained every 16 images from the complete original model), the distance differences increased for both bones (tibia and fibula). For the RMS, reducing the number of slices and using either one of the two applications analyzed would not show any significant differences in the reconstruction, thus allowing the potential reduction of radiation exposure of the patient.

**Keywords:** biomechanical models, fibula, 3D reconstruction, tibia

**Acknowledgements:** The authors are grateful to Universidad Nacional de Colombia for funding the project "Estado de esfuerzos en un elemento de osteosíntesis en la consolidación de una fractura de miembro inferior".

**Language:** English

### Resumen

**Contexto:** Las lesiones no fatales representan un problema de salud pública. Entre ellas, las fracturas de las extremidades inferiores tienen un gran impacto en los costos relacionados con los tratamientos ortopédicos. En este trabajo se realizó una reconstrucción tridimensional de la tibia y el peroné para aplicaciones biomecánicas con el fin de definir los parámetros de reconstrucción 3D que permitan reducir la exposición a la radiación de los pacientes y el costo computacional.

**Método:** Para la reconstrucción 3D se empleó una tomografía computarizada tomada a un voluntario. Se utilizaron dos programas de software especializados en la reconstrucción de imágenes DICOM (Mimics Research y 3DSlicer). Se modificó el número de imágenes 2D incluidas en el volumen y se compararon los resultados. La calidad de los volúmenes reconstruidos se verificó comparando el volumen de referencia reconstruido con el número total de imágenes/cortes frente a los volúmenes modificados. Para ello se utilizó el software MeshLab. Los parámetros analizados fueron las diferencias de distancia entre el modelo de referencia y el alternativo, y el análisis cualitativo de la curvatura.

**Resultados:** Los resultados del ANOVA para la respuesta Max (distancia máxima entre mallas) muestran que el software y los cortes son factores significativos. Sin embargo, la interacción software-cortes no tuvo una influencia significativa. Para la respuesta RMS (Root Mean Square) el software, los cortes y la interacción software\*cortes no son significativos. Para la respuesta media, los cortes y la interacción software-cortes no son significativos. Sin embargo, el software influye significativamente en los resultados. Estos resultados suponen una reducción del coste computacional y de la exposición de los pacientes a radiación en futuros análisis biomecánicos y preoperatorios, ya que se puede obtener la misma calidad incluyendo menos imágenes 2D en la reconstrucción.

**Conclusiones:** Las superficies reconstruidas son más suaves cuando se utiliza Mimics a pesar de que se utilizó el mismo factor de suavidad en ambos programas durante la reconstrucción. Cuando se utilizan 16 cortes (retenidas cada 16 imágenes del modelo original completo), las diferencias de distancia aumentan para ambos huesos (tibia y peroné). Para el RMS, reducir el número de cortes y utilizar cualquiera de los dos programas analizados no presentaría diferencias significativas en la reconstrucción planteándose como una forma potencial para la reducción de la exposición a la radiación del paciente.

**Palabras clave:** modelos biomecánicos, peroné, reconstrucción 3D, tibia

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia la financiación del proyecto "Estado de esfuerzos en un elemento de osteosíntesis en la consolidación de una fractura de miembro inferior".

**Idioma:** Inglés.

## 1. Introduction

The World Health Organization (WHO) defines non-fatal injuries as a public health problem [1]. Within these traumas, tibia injuries have been demonstrated to be one of the most common. Epidemiological studies worldwide report that this type of injury represents the largest number of fractures, which can be attributed to traffic accidents affecting the lower limbs [2], [3]. Moreover, the National Institute of Forensic Medicine reported tibia fractures as the third most prevalent pediatric injury. According to the data reported by the WHO, on an annual basis, between 20 and 50 million people in the world suffer non-fatal injuries due to traffic accidents, highlighting lower limb fractures as a public health problem. Hence, repairing lower limb fractures greatly impacts the costs related to orthopedic treatments around the world. [4], [5] indicate that the leading causes of tibial fractures in developed countries like Sweden between 2011 and 2015 were simple falls (44 %) and traffic accidents (22 %). Tibial fractures can be classified according to their location and type of

injury. The Orthopedic Trauma Association and the AO Foundation classified these fractures by location and morphology, and they provided additional classifications related to open, pediatric, and periprosthetic fractures [6]. Tibial plateau fractures are prevalent, and they have been divided into several groups: lateral and medial tibial plateau fractures, posterior tibial plateau fractures, coronal splits, bicondylar fractures, and under subcondylar fractures [7]. The type of treatment is selected based on the surgeon's experience, and, in some cases, the result can be subjective. Another option to select and evaluate the fixation geometry is the use biomechanical models, which are developed based on a 3D reconstruction of fractured bones.

Biomechanical models allow evaluating and predicting the behavior of potential fixation configurations in different types of fractures using computer simulation and laboratory tests [8]. Computational models also aid in making several therapeutic decisions, such as patient positioning for radiotherapy treatments [9], kidney stones surgery [10], and preoperative orthopedic planning processes [11], [12]. The construction of biomechanical models starts with the acquisition of a stack of 2D cross-sectional medical images (*i.e.*, computerized tomography, CT), which are then volumetrically represented and used in numerical computational analyses. Therefore, improving the image acquisition protocols would provide safer and more cost-effective processes. Experimental analysis of the influence of scan resolution, thresholding, and reconstruction algorithm on CT-based kinematic measurements [13] showed no significant influence on the accuracy of the calculated bone kinematics. Therefore, a lower resolution scan was recommended, which is one of the physical parameters to optimize the quality of the image for it to be good enough to perform a clinical diagnostic or a 3D reconstruction while keeping the patient's radiation exposure as low as possible [14]. This is especially important since low-dose radiation exposure due to the increasingly common use of CT has been associated with a potential increased risk of cancer in patients, especially in children [15].

As mentioned above, the first step to developing a biomechanical model is reconstruction using a 2D stack of tomographic images in a medical image analysis software (such as Mimics or 3DSlicer). Previous reports [16] have found minimum differences when the reconstruction is carried out using different free software applications, which obtained bone models of good quality. The authors postulated that freeware is suitable for 3D bone model reconstruction. In this work, a commercial (Mimics Research 19.0, research license) and free software (Slicer, version 4.11) were included in the analysis to study the offer of computational tools and their compliance with quality standards. This paper aims to evaluate the configurations used for 3D reconstructions in the tibia and fibula for applications in biomechanical fracture models. This evaluation includes the advantages and disadvantages of two software applications, as well as the number of slices required for quality reconstruction, aiming to reduce the potential exposure dose to radiation.

## 2. Experimentation

### 2.1. Acquisition of 2D cross-sectional medical images for 3D reconstruction

Tomography images were taken from an individual male, who was 25 years old and 1,82 m tall, with a weight of 80 kg and no reported pathologies. Before the image acquisition, the volunteer

filled out an informed consent. He was chosen to be used in future studies since his results could be compared to previously collected data available in Opensim databases. The tomographic images were taken using the parameters shown in Table I, based on the CT scan protocol provided by Materialise [17].

**Table I.** Parameters obtained for the CT scan

Parameter	Value	Parameter	Value
Scanning technique	CT	kVp	120
Planes	(Axial, sagittal, coronal) A, S, C	mAs	150
Target tissue	Bone	Pitch	0,9
Field of view -FOV	Width $\leq$ 50 cm. Details: Complete pelvis between the iliac crests. From astragalus to proximal ilium.	Matrix	512 x 512
Slice thickness	0,5 mm	Bones	Tibia and fibula (left and right)
Slice Increment	1,25 mm	Contrast	None
Tilt	None	Image type file	DICOM
Scan type	Helical mode	Overlap	40 % (0,5mm/ 1,25mm)

## 2.2. Selection of reconstruction software

Two software applications with similar capabilities were selected because they were readily available for the study. The selected software was Mimics Research 19.0 (research license) and 3DSlicer (Slicer version 4.11.20210226, open source). The capabilities of the both applications are shown in Table II.

## 2.3. Modeling the tibia

The total number of 2D cross-sectional images (slices) acquired during the CT scan was 2.118. After obtaining the data, the reference model was reconstructed. Alternative models were also reconstructed, creating gaps between the 2D slice files. Table III shows the different number of slices (retained slices from the reference model) used to reconstruct the alternative models. The model's total number of images/slices considered the helicoidal scanning mode, and the same number was used for both software applications.

The general operation principle was similar in both applications, including importing the DICOM files. The threshold values with a minimum of 124 HU and a maximum of 3.071 HU were used. Image segmentation was performed using various tools that met the same objectives in both Mi-

**Table II.** Capabilities of two software used in this study

Software	Operating system	Input Data	Output Data	Features
3DSlicer (Slicer version 4.11.2021022)	Windows MacOS Linux	DICOM, NRRD MetaImage, VTK Analyze, NifTI, BMP BioRad, Brains2, GIPL, JPEG, LSM, PNG Stimulate, TIFF, MGH-NMR, MRC, Electron Density	JPEG, PNG, TIFF, VTK Image, STL, OBJ, volume rendering, NRRD, image segmentation, VTK.	No linear transformations 2D and 3D visualization and interactive segmentation of image and data Support for moduli of command-line interface (CLI) Multiple compatible extensions
Mimics Research 19.0	Windows Linux	CT, $\mu$ CT or MRI, DICOM	STL, OBJ, and PLY formats, volume rendering, and manual or semiautomatic image segmentation.	Thresholding tool and active contour thresholding. STL creation. Mess for FEM Commercial software

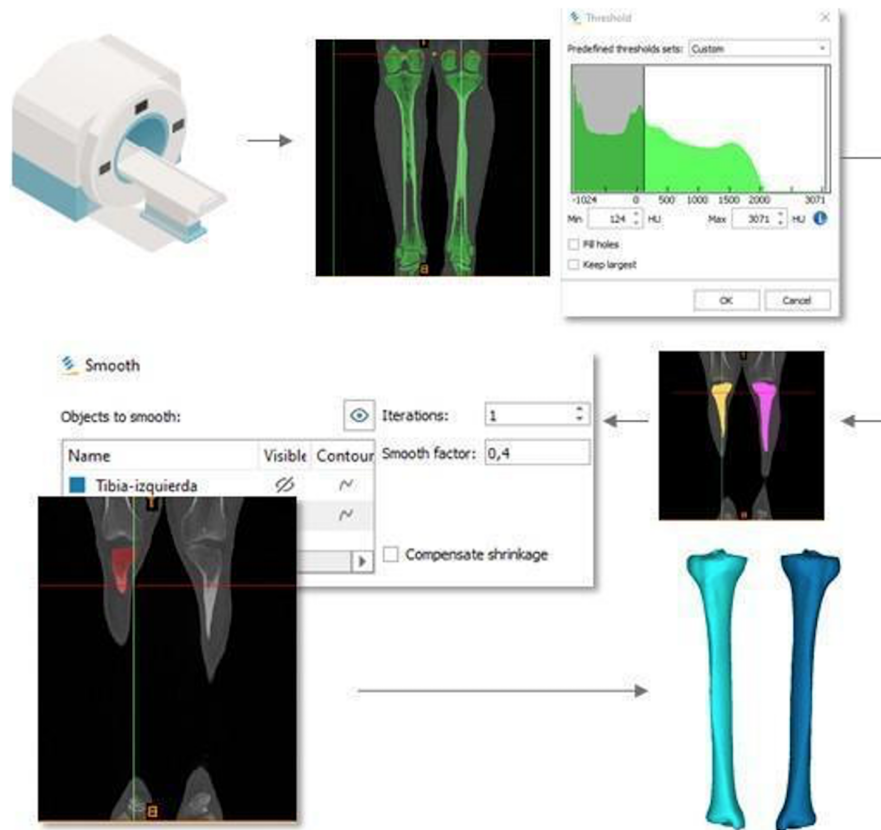
**Table III.** Parameters using different software

Number of slices	Expected gap (mm)	Total number of images
Alternative. model 1: Every 4 images	2	424
Alternative. model 2: Every 6 images	3	303
Alternative. model 3: Every 8 images	4	236
Alternative. model 4: Every 16 images	8	128
Reference model: Full set	0,5	<b>2.118</b>

mics and 3D Slicer. A smooth factor of 0,4 was performed in two iterations, as well as minimal intervention of manual segmentation of the mask. A schematic representation of the steps used to obtain the model is shown in Fig. 1.

## 2.4. Analysis of reconstructed tibias and fibulas

A factorial design was used to analyze the effect of two factors: software and the number of slices in the RMS (root mean square), Max (maximum distance between meshes), and Mean distance



**Figure 1.** Schematic representations of the steps used to obtain the volumetric model

responses. The responses were obtained via the Euclidean distance of the model with a reduced number of slices vs. the control (the model with the complete number of slices). The MeshLab software was used to calculate the Hausdorff distance, which refers to the maximum distance between two subsets of points, where one belongs to an x-mesh, and the other belongs to a y-mesh. MeshLab samples each point belonging to the x-mesh and takes the closest point of the y-mesh. Therefore, it is very important to perform a previous alignment process between the meshes as accurately as possible. It is also essential to take as many points as possible when applying the filter, which can be ensured by sampling the vertices, edges, and faces [18]. The software factor had two levels: Mimics and 3D Slicer. The number of slices factor had four levels: 4, 6, 8, and 16. The alternative reconstructed models were compared with the reference model, and the right tibia and left tibia were considered as replications. The experimental setup is shown in Table IV. Residual plots were used to test the normality, independence, and constant variance assumptions (data not shown). Outliers identified via scatter plots were extracted from the analysis. The incidence of the effects and two-level interactions was evaluated via ANOVA ( $p < 0,05$ ).

**Table IV.** Experimental setup for the factorials design

Run Order	Blocks	Software	Slices	y1 RMS	y2 Max	y3 Mean
16	Left tibia	Mimics	4	0,0903	0,8401	0,0633
15		Mimics	6	0,1311	0,7851	0,106
12		Mimics	8	0,1981	1,3788	0,1448
10		Mimics	16	0,289	1,3786	0,2542
9		3D Slicer	4	0,1453	0,7742	0,0473
14		3D Slicer	6	0,147	0,8535	0,0654
13		3D Slicer	8	0,1829	0,9685	0,1131
11		3D Slicer	16	0,2266	1,0433	0,1355
2	Right tibia	Mimics	4	0,2627	0,6525	0,2548
4		Mimics	6	0,298	1,097	0,2815
6		Mimics	8	0,3327	1,4137	0,2946
1		Mimics	16	0,268	1,9779	0,1555
3		3D Slicer	4	0,0832	0,9433	0,1094
7		3D Slicer	6	0,1093	0,9073	0,1096
8		3D Slicer	8	0,1566	1,0809	0,1466
5		3D Slicer	16	0,2185	1,0426	0,1724

### 3. Results and discussion

From the p-values, software ( $p = 0,02$ ) and slices ( $p = 0,007$ ) are significant for the response. The software affects the Max of the calculated distances because the line is not horizontal. Moreover, the Mimics software has a higher Max value than 3D Slicer. The number of slices also affects the Max, and, as observed in Figs. 2c and 2d, the highest number was obtained when extracting 16 slices. The overall mean is marked in the dotted reference line. As seen in Fig. 2d, 3DSlicer reports lower Max values in most cases related to slices. However, the p-value (0,060) reveals that this interaction is not significant. The ANOVA results for Max RMS and Mean can be seen in appendix Tables SI, SII, and SIII, respectively.

Figs. 2a and 2b show the Mean effects and interaction plots, respectively. As observed, 3DSlicer has lower RMS values than Mimics, and the higher RMS was noticed with the 16 slices. However, from the p-values, software ( $p = 0,07$ ), slices ( $p = 0,24$ ), and the interaction between software and slices ( $p = 0,97$ ) are not significant for the RMS response. On the other hand, the highest mean value was observed for the model with 8 slices (Figs. 2e and 2f). However, slices ( $p = 0,56$ ) and the software-slices interaction ( $p = 0,95$ ) are not significant for the response. Nevertheless, software ( $p = 0,046$ ) significantly influences the response, and 3DSlicer had a lower Mean value than Mimics.

Visible differences are spotted in the 3D images when using both reconstruction software applications. Fig. 3 shows the reference model for Mimics and its corresponding 3DSlicer reconstructions. The first interesting change is related to the visual smoothness of the surface. Generally speaking, the surfaces are smoother when using Mimics, even though the same smooth factor was used in 3DSlicer. There are indeed differences in the smoothing algorithms. The wrapping tool in Mimics deletes rough areas and gaps in the model, which is especially useful in numerical analyses [19]. Since the 2D cross-sectional images were acquired using the helical mode, the removal of images



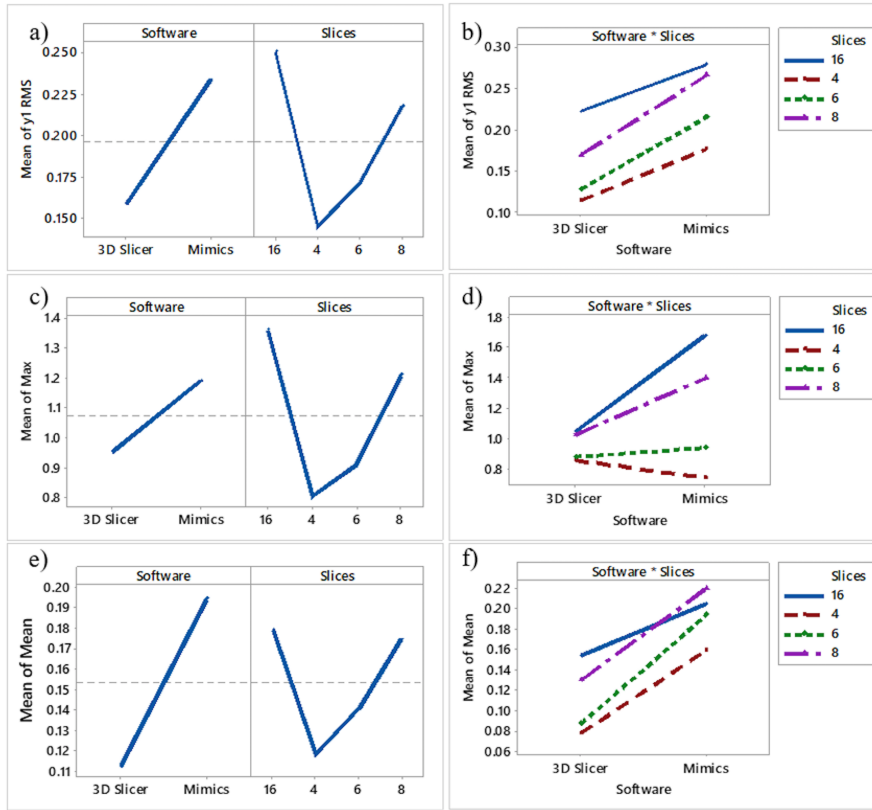
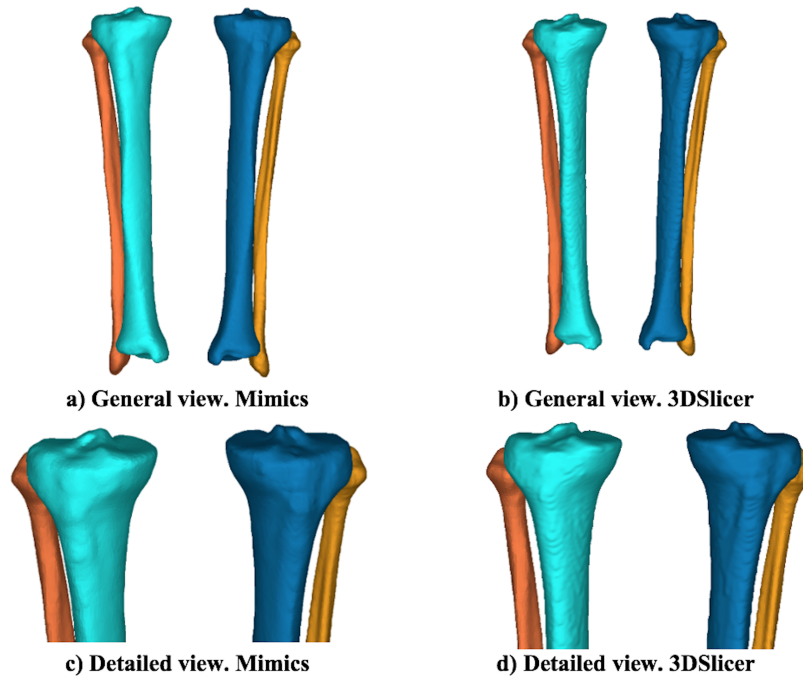


Figure 2. Main effects and interaction plots for RMS, Max, and Mean

considered potential helicoidal artifacts. On the other hand, the smoothing process in 3DSlicer consists of the remotion of small extrusions and the filling of small gaps without changing the smooth contours [20]. Additionally, Boolean operations were used in 3DSlicer to simulate the wrapping tool in Mimics.

Fig. 4 shows the distance differences from the reference model for both bones using Mimics for the most representative alternative models. In addition, the distance difference between the reference models and the alternative models obtained using each software is shown. When the distance between the two models is larger, the color tends towards red, and when the vertex is close, the color tends to be blue. The chromatic scale defines the intermediate values. The results suggest that the distances between the reference model and the alternative model are neglectable when using 4 slices in the reconstruction. However, with 16 slices, the differences increased, as shown in the changes in the color scale (from blue to red) around the tibia and fibula. The greatest differences (red) in all cases are located at the proximal tibia, given that the complexity of the geometry increases in that area (the tibial plateau). When the two applications are compared, the visual differences are concentrated at the image's top-left area (proximal zone) for the tibia and at the top-right for the



**Figure 3.** Reference model after reconstructions: a) and c) Mimics; b) and d) 3DSlicer

fibula. However, along the length of the bone, the model turns blue, meaning that the reconstruction of each software is very similar. Moreover, the reference model has been colored for comparison purposes. The zones at the Figure that do not have a chromatic scale indicate that, locally, the reconstructed model is larger than the reference model.

Figure 5 shows the curvature analysis for the left tibia and right fibula alternative models, as well as the reference models using both Mimics and 3DSlicer. The greatest curvature value displayed is 1, and the smallest one is 0,0010. As the radius of curvature decreases, color changes from black (0,0010) to blue, green, and red (1,0000). As the radius of curvature increases, the curvature value decreases. A planar surface has a curvature value of zero because the radii of flat faces are infinite. The results showed that there are no noticeable differences between the reference model and the model reconstructed using 4 slices (not shown). However, when 16 slices are used to reconstruct the alternative model, the curvature (and the continuity) of the surfaces is affected.

Another important difference between the reference and alternative models (16 slices) are compared is the mesh size (element size) in the STL file. When 16 slices are used, the software (Mimics) cannot provide continuity for the surfaces, and some empty elements can be identified (see the empty element in black in Fig 5b at the top-right). When the number of slices is 16, the wrapping tool should be modified as slices are removed. However, in this work, the same wrapping tool was used

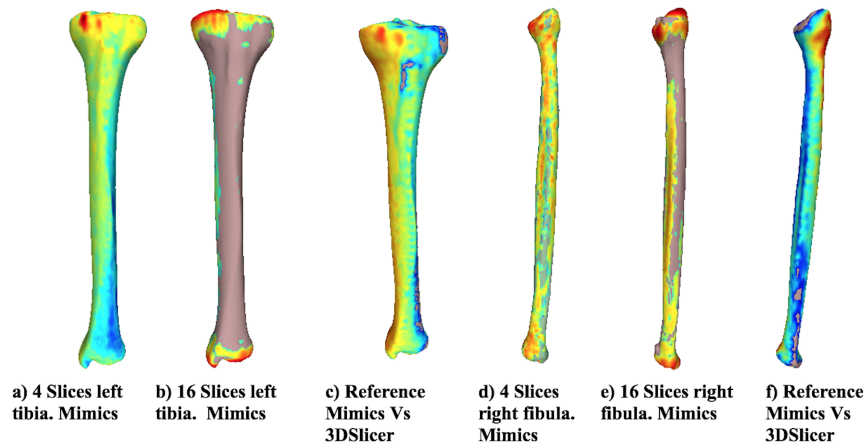


Figure 4. Distance from the reference model

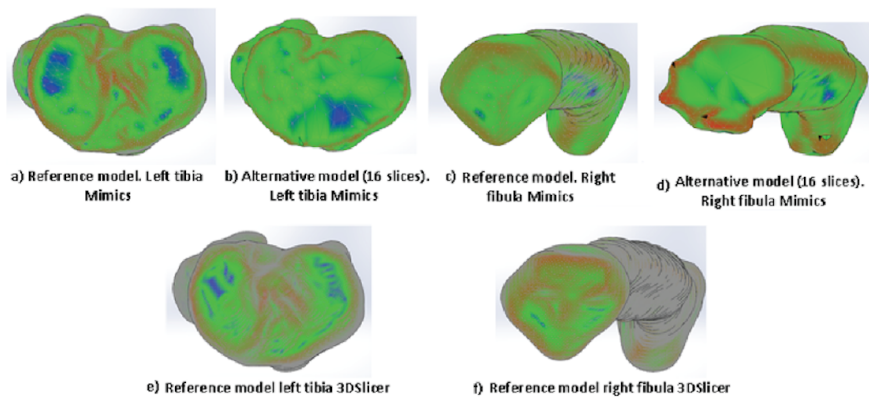
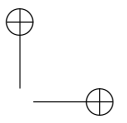
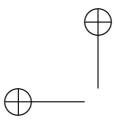


Figure 5. Curvature analysis for different numbers of slices (tibia and fibula)

for comparison purposes. The same behavior was identified for the tibia and fibula, where several empty elements can be observed in Fig. 5d.

The alternative model (16 slices) for the fibula shows that the mesh size is extremely large, and it does not properly describe the curvature in the proximal zone of the fibula. On the contrary, the curvature along the shaft of the fibula is very similar since the geometry is less complex than the fibular head. Figs. 5e and 5f show the reference model reconstructed using 3DSlicer. The first interesting result is related to the size of the elements. The mesh created using the same procedure in Mimics provides a reference model with more details in the proximal zone of both bones. The curvature is similar for the model reconstructed using Mimics for the proximal zone. However, the surfaces are smoother when reconstructed using Mimics.



To summarize, in this work, the differences between the two software applications were investigated to create STL bone models. The manual intervention by the operator was limited as much as possible by using the same processing parameters, even though the segmentation algorithms of this software are not known. Another important detail related to the processing performed in order to obtain an STL file is that, when the model is exported using the ASCII file, the imported model is less prone to show errors in MeshLab. The same behavior has been reported by other authors [16]. In this work, the mesh parameters, such as the number and density of the triangles in the mesh, were only qualitatively specified. Future work could focus on quantifying the parameters of the mesh after the final file is generated. This result suggests that the individual physical size of the triangles depends on the analyzed bone (tibia or fibula).

## 4. Conclusions

This work revealed that the software-slices interaction did not significantly influence any of the analyses. The main effects and interaction plot showed that the highest differences were observed in the 16-slice model for the tibia with the RMS and Max analysis. Furthermore, the reconstructed surfaces were smoother when Mimics was used, even though the same smooth factor was used in both software applications during the reconstruction. Nevertheless, Mimics reported continuity issues, and it had the highest RMS and Max.

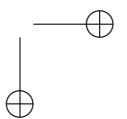
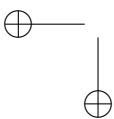
As for the RMS distance, reducing the number of slices and using either of the applications analyzed, without nature of proof, would not present a significant difference in the reconstruction allowing for the reduction in radiation exposure and computational cost. However, for the Max distance, the reduced mesh would present a significant difference compared with the original reconstruction. For the Mean distance, the mesh would only be affected by the software used and not by the reduced number of slices.

## 5. Acknowledgments

The authors are grateful to Universidad Nacional de Colombia for funding the project *Estado de esfuerzos en un elemento de osteosíntesis en la consolidación de una fractura de miembro inferior* (Stress state in an osteosynthesis element in the consolidation of a lower limb fracture, code H:50195).

## References

- [1] OMS, "Accidentes de tránsito," 2018. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries> (accessed Jul. 13, 2021). ↑452
- [2] K. Gichuhi, "Injury Pattern Among Non-fatal Road Traffic Crash Victims," *East Afr. Orthop. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 23-25, 2010. <https://doi.org/10.4314/eaoj.v1i1.49454> ↑452
- [3] R.-H. Pan *et al.*, "Epidemiology of Orthopedic Fractures and Other Injuries among Inpatients Admitted due to Traffic Accidents: A 10-Year Nationwide Survey in Taiwan," *Sci. World J.*, vol. 2014, ID. 637872, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/637872> ↑452



- [4] J. D. Heckman and J. Sarasohn-Kahn, "The economics of treating tibia fractures. The cost of delayed unions," *Bull. Hosp. Jt. Dis.*, vol. 56, No 1, pp 63-72, 1997. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9063607/> ↑452
- [5] D. Wennergren, C. Bergdahl, J. Ekelund, H. Juto, M. Sundfeldt, and M. Möller, "Epidemiology and incidence of tibia fractures in the Swedish Fracture Register" *Injury*, vol. 49, no. 11, pp. 2068-2074, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2018.09.008> ↑452
- [6] E. Meinberg, J. Agel, C. Roberts, M. D. Karam, and J. F. Kellam, "Fracture and Dislocation Classification Compendium-2018," *J. Orthop. Trauma*, vol. 32, no. 1, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000001063> ↑453
- [7] S. H. Khan, A. J. Ahmad, and M. Umar, "Tibial Plateau Fractures: A New Classification Scheme," *Clin. Orthop. Rel. Res.*, vol 375, pp. 231-242, Jun. 2000. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10853174/> ↑453
- [8] H. Sun, Q. F. He, B. Bin Zhang, Y. Zhu, W. Zhang, and Y. M. Chai, "A biomechanical evaluation of different fixation strategies for posterolateral fragments in tibial plateau fractures and introduction of the 'magic screw'," *Knee*, vol. 25, no. 3, pp. 417-426, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2018.03.015> ↑453
- [9] Nelson, V., Deshpande, S., Gray, A. *et al.* "Comparison of digitally reconstructed radiographs generated from axial and helical CT scanning modes: a phantom study," *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.*, vol. 37, pp. 285-290, Mar. 2014. <https://doi.org/10.1007/s13246-014-0257-x> ↑453
- [10] A. Tsaturyan *et al.* "Technical aspects to maximize the hyperaccuracy three-dimensional (HA3D™) computed tomography reconstruction for kidney stones surgery: a pilot study," *Urolithiasis*, vol. 49, pp. 559-566, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00240-021-01262-6> ↑453
- [11] J. Huo *et al.*, "Value of 3D preoperative planning for primary total hip arthroplasty based on artificial intelligence technology," *J. Orthop. Surg. Res.*, vol. 16, art. no. 156, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02294-9> ↑453
- [12] G. Marongiu, R. Prost, and A. Capone, "Use of 3D modelling and 3D printing for the diagnostic process, decision making and preoperative planning of periprosthetic acetabular", *BMJ Case Rep.*, 13, no. 1, art no. e233117., Jan. 2020. <https://doi.org/10.1136/bcr-2019-233117> ↑453
- [13] C. J. Tan, W. C. H. Parr, W. R. Walsh, M. Makara, and K. A. Johnson, "Influence of Scan Resolution, Thresholding, and Reconstruction Algorithm on Computed Tomography-Based Kinematic Measurements", *J. Biomech. Eng.*, vol. 139, no. 10, art. no. 28787471, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4037558> ↑453
- [14] J. Aldrich *et al.*, *Dose Reduction in CT while Maintaining Diagnostic Confidence: A Feasibility/Demonstration Study*, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2009. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1621\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1621_web.pdf) ↑453
- [15] D. J. Brenner, "Computed Tomography — An Increasing Source of Radiation Exposure", *N. Eng. J. Med.*, vol. 357, no. 22, pp. 2277- 2284, Nov. 2007. <https://dx.doi.org/10.1056/NEJMra072149> ↑453
- [16] K. Matsiushevich, C. Belvedere, A. Leardini, and S. Durante, "Quantitative comparison of freeware software for bone mesh from DICOM files," *J. Biomech.*, vol. 84, pp. 247-251, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.12.031> ↑453, 461
- [17] Materialise, "CT scan protocol leg 3 regions", 2017. <https://www.materialise.com/en/resources/all/scan-protocols> (accessed Jul. 13, 2021). ↑454
- [18] Aloopingicon, "Stuff: Measuring the difference between two meshes", 2010. <http://meshlabstuff.blogspot.com/2010/01/measuring-difference-between-two-meshes.html> (accessed Jul. 13, 2021). ↑456
- [19] Mimics, "Mimics Student Edition Course Book", 2021. <https://www.materialise.com/en/medical/mimics-innovation-suite/academic-research-education> (accessed Jul. 13, 2021). ↑457
- [20] 3DSlicer, "Documentation/4.10", 2021. <https://www.slicer.org/wiki/Documentation/4.10>, (accessed Jul. 13, 2021). ↑458

## Juan Ramírez

Mechanical engineer and PhD in Engineering from Universidad Nacional de Colombia. I have been an Associate Professor at the same university since 2003. In addition, between 2018 and 2020, I was the Vice-dean of Research at the Department of Mines - Universidad Nacional de Colombia. Nowadays, I am acting as the director of GIBIR

(Biomechanics and Rehabilitation Research Group), where 4 PhD and more than 10 MSc have been formed.  
Email: jframirp@unal.edu.co.

---

### **Juan Atehortúa-Carmona**

Mechanical engineer, Master's degree student in Mechanical Engineering from Universidad Nacional de Colombia. I am currently a project design manager engineer and a researcher of GIBIR (Biomechanics and Rehabilitation Research Group).  
Email: jfatehortuac@unal.edu.co.

---

### **Juan Felipe Santa-Marin**

BSc in Mechanical Eng. (2005), M. Eng. in Materials and Process Engineering (2008) and PhD. in Engineering with emphasis in Materials Science and Technology (2013) from the same university. He is currently a researcher for the Advanced Materials and Energy (MATyER) Research Group at Instituto Tecnológico Metropolitano. His interests include materials in general with emphasis on wear, processing, and physicalchemical and mechanical characterization of materials.  
Email: jfsanta@gmail.com.

---

### **Maria Camila-Naranjo**

Mechanical Engineering student from Universidad Nacional de Colombia and a researcher of GIBIR (Biomechanics and Rehabilitation Research Group).  
Email: mcnaranjoc@unal.edu.co.

---

### **Valentina Mejía-Gallón**

Mechanical Engineering student from Universidad Nacional de Colombia and a researcher of GIBIR (Biomechanics and Rehabilitation Research Group).  
Email: vamejiag@unal.edu.co.

---

### **Samuel Vallejo Pareja**

Mechanical engineer (2019) from Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, and researcher of GIBIR (Biomechanics and Rehabilitation Research Group) since 2016. Project design manager engineer at Universidad Nacional de Colombia (2019-2020). Since 2020, researcher of BIOMATIC (Biomechanics, materials, ICTs, design and quality for the leather, plastics and rubber sector and its production chains Research Group) at Sistema Nacional de Aprendizaje (SENA), Itagüí, Antioquia, Colombia. Currently a Master's degree student in Mechanical Engineering at Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. My research interests include mechanical design, computational mechanics, and biomechanics.  
Email: savallejopa@unal.edu.co.

---

### **Viviana M. Posada**

BSc. in Biomedical Engineering (2012), M. Eng. in Mechanical Engineering (2016) and PhD in Mechanical and Mechatronics Engineering (2021) from Universidad Nacional de Colombia. She currently works as assistant researcher of GIBIR (Biomechanics and Rehabilitation Research Group) at Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.  
Email: vmposadap@unal.edu.co.

## Appendix

**Table S. I.** Analysis of Variance for Max

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Blocks	1	0,07468	0,07468	2,70	0,145
Software	1	0,22803	0,22803	8,24	0,024
Slices	3	0,80435	0,26812	9,68	0,007
2-Way Interactions	3	0,32995	0,10998	3,97	0,060
Software*Slices	3	0,32995	0,10998	3,97	0,060
Error	7	0,19381	0,02769		
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>1,63082</b>			

**Table S. II.** Analysis of Variance (y1 RMS)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Blocks	1	0,006348	0,006348	1,28	0,295
Software	1	0,022538	0,022538	4,54	0,071
Slices	3	0,026435	0,008812	1,78	0,239
2-Way Interactions	3	0,001082	0,000361	0,07	0,973
Software*Slices	3	0,001082	0,000361	0,07	0,973
Error	7	0,034737	0,004962		
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>0,091140</b>			

**Table S. III.** Analysis of Variance (Mean)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Blocks	1	0,022112	0,022112	4,86	0,063
Linear	4	0,036848	0,009212	2,02	0,195
Software	1	0,026847	0,026847	5,90	0,046
Slices	3	0,010001	0,003334	0,73	0,565
2-Way Interactions	3	0,001619	0,000540	0,12	0,946
Software*Slices	3	0,001619	0,000540	0,12	0,946
Error	7	0,031862	0,004552		
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>0,092440</b>			

## An Approach from Software Engineering to an IoT and Machine Learning Technological Solution that Allows Monitoring and Controlling Environmental Variables in a Coffee Crop

*Un enfoque desde la ingeniería de software a una solución tecnológica de IoT y aprendizaje automático que permita monitorear y controlar las variables medioambientales en un cultivo de café*

William Ruiz-Martínez<sup>1</sup>, Arnaldo Andrés González-Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (Bogotá, Colombia).  
correspondence e-mail: william\_ruizmar@cun.edu.co, arnaldo\_gonzalez@cun.edu.co

Recibido: 15/08/2021. Modificado: 27/08/2021. Aceptado: 15/09/2021.

### Abstract

**Context:** Software engineering allows us to approach software design and development from the practical application of scientific knowledge. In the case of this IoT solution and the machine learning approach to the monitoring and control of environmental variables in a coffee crop, it allows us to visualize certain artifacts of the system in their interaction with users and their behavior with other artifacts or devices that constitute a technological solution.

**Method:** For this work, the application of software engineering from a conceptual approach and the behavior of the system is proposed. To meet these objectives, we decided to use the Unified Modeling Language (UML) in such a way that the most important components of the technological solution could be represented from a static perspective through the use case diagrams, as well as from a dynamic viewpoint through the sequence diagrams.

**Results:** Through the application of the UML, it was possible to develop the conceptual and behavioral modeling of certain artifacts and components. This knowledge allowed identifying the interaction between physical components and devices (machine to machine) and human-machine interaction, that is, the relationship between users and the processes that make up the technological solution.

**Conclusions:** Through software engineering, and more specifically the UML, we were able to establish the importance of knowing the different software artifacts that make up a system or application from a different technical and functional approach, while being able to collect valuable information about the behavior of certain system artifacts, as well as the interaction between users and processes.

**Keywords:** Internet of Things, machine learning, computer application, UML, static views, dynamic views, conceptual modeling, behavioral modeling

**Language:** English

### Open access



Cite this paper as: Ruiz Martinez, W, Gonzalez Gomez Arnaldo Andres. An approach from the software engineering of an IoT and machine learning technological solution that allows monitoring and controlling environmental variables in a coffee crop. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 465-478. © The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://doi.org/10.14483/23448393.18495>



### Resumen

**Contexto:** La ingeniería de software nos permite abordar el diseño y desarrollo de software desde la aplicación práctica del conocimiento científico. En el caso de esta solución de IoT y el enfoque de aprendizaje automático en el monitoreo y control de las variables medioambientales en un cultivo de café, nos permite visualizar determinados artefactos del sistema en su interacción con los usuarios y en el comportamiento con otros artefactos o dispositivos que integran una solución tecnológica.

**Método:** Para el presente trabajo, se plantea la aplicación de la ingeniería del software desde un enfoque conceptual y del comportamiento del sistema. Para cumplir con estos objetivos se optó por emplear el lenguaje unificado de modelado (UML) de forma tal que se pudieran representar los componentes más importantes de la solución tecnológica desde una perspectiva estática a través de los diagramas de casos de uso y desde el punto de vista dinámico a través de los diagramas de secuencia.

**Resultados:** Mediante la aplicación del UML, fue posible desarrollar el modelamiento conceptual y del comportamiento de ciertos artefactos y componentes. Este conocimiento permitió identificar la interacción entre componentes y dispositivos físicos (máquina a máquina) y la interacción hombre-máquina, es decir, la relación entre usuarios y procesos que componen la solución tecnológica.

**Conclusiones:** A través de la ingeniería de software y más específicamente del UML, pudimos establecer la importancia de conocer los diferentes artefactos que componen un sistema o aplicación desde un enfoque técnico y funcional diferente, pudiendo recopilar información valiosa sobre el comportamiento de ciertos artefactos del sistema, así como de la interacción entre usuarios y procesos.

**Palabras clave:** Internet de las cosas, aprendizaje automático, aplicación informática, UML, vistas estáticas, vistas dinámicas, modelamiento conceptual, modelado del comportamiento

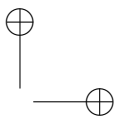
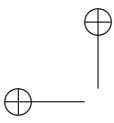
**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

Many times, we have wondered why software engineering is so important today; we cannot ignore the potential growth of the software industry at a global level. But how can we define software engineering? Let us take some valuable definitions from experts on the subject. According to [1], software engineering is the study of the principles and methodologies for the development and maintenance of software systems.

In another definition given by [2], the author defines software engineering as the practical application of scientific knowledge to the design and construction of computer programs and the associated documentation required to develop, operate, and maintain them. This is also known as software development or software production. It is the application of a systematic, disciplined, and quantifiable approach to the development, operation, and maintenance of software, that is, the application of software engineering [3].

By analyzing the above, we can develop our own definition and establish that software engineering is actually a discipline or area that is responsible for generating a series of methodologies or guidelines to develop the life cycle of the software, regardless of the adapted or implemented methodology, but always seeking to comply with each of its phases or stages through deliverables or documentation that allows supporting the functionality or interaction of an artifact or system component with other components or roles of the same system or, in certain cases, with subsystems or external systems as needed.



More specifically, we want to delve into aspects such as conceptual modeling and system behavior while using the Unified Modeling Language (UML). According to [4], UML is a standard that has been adopted internationally by numerous organizations and companies to create schematics, diagrams, and documentation related to software development (informatic programs).

According to [5], UML is the combination of three different methodologies developed by its creators, who aim for the user to understand the reality of the implemented technology, as well as giving them the possibility to make decisions before investing large amounts of money and time in projects if they are not sure about their development, and much less in the construction of artifacts that will constitute said model.

Considering the above, we can conclude that UML is a standard for the construction of software models that allows knowing the operation of certain artifacts or components of a software development, as well as the interaction that said components or artifacts may have with the users of the system, with other devices or artifacts, with subsystems of the same system, or even with other external systems.

This article presents the application of software engineering regarding the lifting of functional and non-functional requirements, conceptual modeling, and the behavior of a series of artifacts that represent certain functionalities of a technological solution based on technologies such as the Internet of Things (IoT) for data collection and artificial intelligence techniques such as machine learning for data analysis. Such integration of technologies seeks to monitor and control overall performance, as well as the performance of certain environmental variables that have an impact on a coffee crop and its production. It should be clarified that we do not intend to publicize the operation of the solution from the perspective of its technical or technological characteristics, but, as previously expressed, to provide a perspective of the technological solution from the point of view of its conceptual modeling and the behavior of its main artifacts or components.

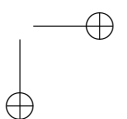
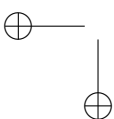
In crops, especially coffee, the control of environmental variables is considered a vital aspect in the harvest process, since the correct evaluation of variables such as temperature, environmental humidity and soil humidity, among others, depends to a great extent on measuring the quality of the resulting grain.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Research methodology

For the development of this research, the following phases we can see in fig. 1:

1. **Document review:** In this phase, a review of different documents related to the proposed topic was conducted, with the aim of establishing the artifacts or components that represent the most prominent and important functionalities of the technological solution. Two approaches contemplated by the UML were used: static and dynamic views.



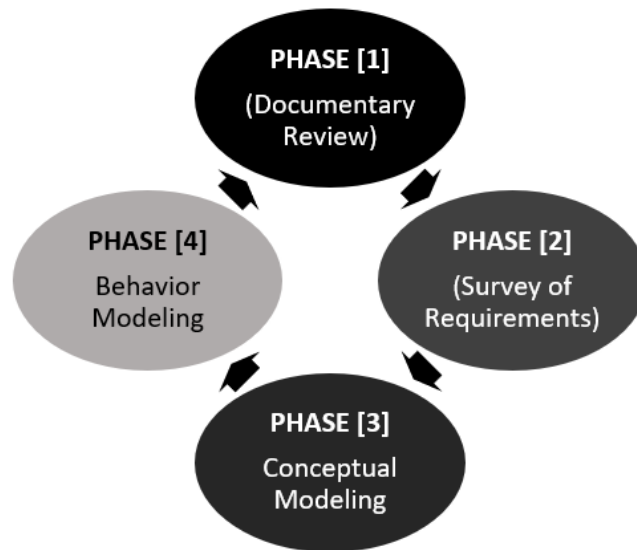
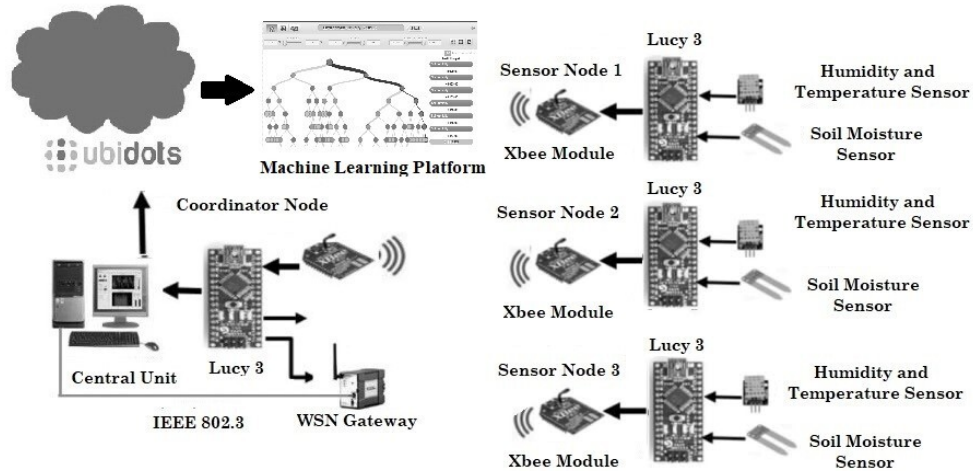


Figure 1. Phases of the research proposed for the development of the project

2. **Survey of requirements:** It is carried out in accordance with the information collected to determine and document the functional and non-functional requirements of the technological solution.
3. **Conceptual modeling:** A general use case diagram is presented, where the main processes of the technological solution and the interactions with users or actors are visualized. Subsequently, sub-use case diagrams of three of the main processes and their respective documentation are made.
4. **Behavioral modeling:** The diagrams of the behavior part of the technological solution are elaborated. For this specific case, the construction of a component diagram and a deployment diagram is proposed.

## 2.2. Description of the architecture

This section presents the architecture design of the wireless network used in the project, as well as its components and devices. It also identifies the protocols used for communication, as can be seen in Fig. 2. It is a wireless sensor network (WSN), which is made up of a series of devices distributed autonomously in a growing area. The proposed system consists of three sensor nodes, and each of these nodes consists of a Lucy3 programmable card, to which a temperature and humidity sensor and a soil humidity sensor are connected. Each node is located at a distance of 100 linear meters from each other, covering a total area of 300 linear meters of coffee crops. The nodes communicate with each other wirelessly via the ZigBee protocol of the modules (Xbee Module) installed in each one. They also communicate with the Gateway, which is responsible for complementing

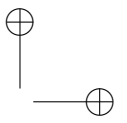
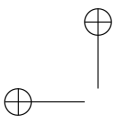


**Figure 2.** Architecture of the wireless sensor network and the cloud platforms

the information sent wirelessly with a wired network. The protocol selected for the project is the ZigBee standard in an ISM 2.4 GHz channel, with a transmission speed of 250 Kbps, and based on the IEEE 802.15.4 or IEEE 802.11 (WIFI) standards or proprietary radios, which are normally 900 MHz [6]. The Zigbee protocol was selected for the project considering factors such as low device costs, transmission distance, and low power consumption of nodes and sensors.

A Gateway is responsible for coordinating and communicating the sensor nodes with the base station through the 802.3 standard. Finally, the data collected through the sensors is sent to a central unit or base, where it is uploaded to the cloud platform, Ubidots, which is a very user-friendly platform for monitoring sensors and actuators, in addition to its ease of configuration and low costs when acquiring a charging plan and data monitoring is desired. This information is sent from the base station for later storage and processing. Subsequently, a file in CSV format is downloaded from this platform. This input is uploaded to the BigML platform, where it goes to the information analysis phase and the application of the supervised learning model, which allows decision-making regarding the behavior of the environmental variables in the crop and their corresponding corrective measures or actions to be taken.

For the communication between sensor nodes and Gateway, we found several standards that meet the necessary characteristics and conditions, but the ZigBee 802.15.4 protocol or standard was selected, mostly due to economic factors. The ZigBee Alliance [7], comprises an association of industries that work together to develop standards and products. ZigBee is the name of the specification for a set of high-level wireless communication protocols for use in low-consumption digital broadcasting applications, which is based on the IEEE 802.15.4 standard for wireless personal area networks Network or WPAN. ZigBee technology is integrated into a wide range of products and applications for commercial, industrial, and government consumers.



### 2.3. System requirements

Requirements engineering allows us to know the needs of the interested parties with respect to an information system, regardless of whether it is based on hardware components for operability or functionality. In the same way, it is evident that hardware without software does not make any sense.

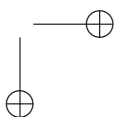
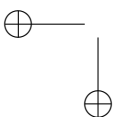
It is interesting to know the opinion of some experts on the term *requirements*. According to [8], it refers to a condition or need of the user to solve a problem and achieve a goal. Another definition given by [9] states that requirements are the capabilities and conditions with which the proposed system must be identified. Likewise, [9] define it as the branch of software engineering that deals with setting the objectives, functions, and restrictions of software systems, as well as with the relationship between these factors in order to establish precise specifications. According to [10], requirements engineering is the discipline in charge of developing complete, consistent, and unambiguous specifications, which will serve as the basis for common agreements between all parties involved, where the functions that the system will perform are also described. In general, we can say that it is a process by which different points of view are exchanged between users, clients, sponsors (i.e., stakeholders), and members of a development team, in order to collect and model what and how the proposed system should perform. Likewise, this process uses a set of methods, tools, and actors that generate a model from which a requirements document is created.

As for the technological solution to be developed, Table I shows its functional requirements, which, according to [11], are those that express or describe the nature of the system's operation in relation to its environment, regardless of its implementation. They also specify how the system should react to particular inputs and how it should behave under particular situations. In general they determine *what the system should do* [12].

On the other hand, the non-functional requirements must also be considered, which can be defined as those criteria or aspects of the system that do not have a direct relationship with its functional behavior (*how should the system interact based on indirect factors?*). These requirements are also regarded as restrictions on the services and functionalities offered by the system. According to [13], non-functional requirements represent general characteristics and restrictions of the application or technological solution that is being developed. Additionally, their definition tends to be difficult, since their conformity or non-conformity could be subject to free interpretation, for which it is advisable to accompany its definition with acceptance criteria that can be measured. Regarding the technological solution to be developed, Table II relates the non-functional requirements.

### 2.4. Conceptual modeling

According to [14], conceptual modeling represents the initial phase of the development of permanent data design and data storage for a system. In many cases, persistent data are managed by a relational database management system (RDBMS). In this phase or stage of the life cycle, it is a matter of establishing how the system will perform the functionalities that were raised in the requirement. In a few words, it will answer the question: *how is the system going to do it?* It is important to start with an introduction to the Unified Modeling Language (UML).



**Table I.** Functional requirements of the technological solution

Code	Req. Name	Description	Priority
RF-001	The sensors must be configured.	The sensors must be configured to collect soil humidity, ambient temperature, and ambient humidity data.	Low
RF-002	The sensors must collect data on environmental variables.	The sensors placed in each of the nodes that make up the wireless sensor network (WSN) measurement the conditions of humidity, ambient temperature, and soil humidity in a coffee crop every 60 seconds.	High
RF-003	The communication module must send the data to the Gateway or to another node as needed.	As shown in Fig. 2, each sensor node has a communication module based on the Xbee protocol. This module is in charge of sending data through the wireless network to the Gateway or, in a specific case, from one node to another if necessary.	High
RF-004	The Gateway must send the data received from the nodes to the base station.	Upon receiving the information from the sensor nodes, the Gateway must send this information to the base station.	High
RF-005	An operating system must be installed and configured to receive data from the Gateway.	In this case, TinyOS-1.x was chosen, which is an open-source operating system for embedded sensor wireless networks.	Low
RF-006	It must be possible to generate a file to be uploaded to the Ubidots platform.	This file should be uploaded automatically on a daily basis in order to store the data collected by the sensors on the measurements made to environmental variables such as humidity, relative temperature, and soil humidity.	High
RF-007	One must be able to download a file in CSV format in order to upload it to the BigML platform.	Twice a week, it should be possible to download a file in CSV format that contains the data collected by the sensors on the measurements carried out on environmental variables such as humidity, relative temperature, and soil humidity.	Medium
RF-008	The uploaded data must be transformed.	Once the CSV file is uploaded to the BigML platform, a data transformation must be performed to generate a readable format adapted to the subsequent application of a learning model.	Medium
RF-009	A dataset must be generated.	Once the transformation of the data in the CSV file has been completed, an already transformed dataset is generated so that a learning model can be applied to it.	Medium
RF-010	A learning model must be applied, and its results must be evaluated	With the dataset ready, the appropriate learning model must be applied (in this case, decision trees) and its results evaluated.	Low
RF-011	The obtained results must be evaluated.	The applied learning model is evaluated, and it is determined whether its results are adequate to determine the validity of the learning model.	Low
RF-012	Decision-making procedures must be established.	Decision-making procedures are established according to the results of the applied learning model.	Medium
RF-013	The application of a new learning model must be evaluated.	If the model was not satisfactory, we proceed with the application and evaluation of the results produced by a new learning model.	Low

**Table II.** Non-functional requirements of the technological solution

Code	Req. Name	Description	Quality
RNF-001	The security of the technological solution must be guaranteed.	Any intruder can access the information from a wireless sensor network because the nodes are usually distributed in an easily accessible environment, and security in wireless networks is still very unreliable. To guarantee data security, symmetric key algorithms such as (SKE), message authentication codes (MAC), and public key cryptography (PKC) are proposed.	Execution
RNF-002	The scalability of the technological solution must be guaranteed.	The network architecture must allow adding new nodes without affecting the performance of the system. The initial network consists of three sensor nodes. Each node has several types of sensors to collect sensitive information about the crop under study, which covers an area of 300 linear meters, if monitoring of an area is required. It must be taken into account that each sensor node covers an area of 100 linear meters, in addition to requiring repeaters to amplify the signal and avoid noise interference or data loss due to latency.	Evolution
RNF-003	The functionality of the technological solution must be guaranteed.	The nodes and their sensors must provide a function to the technological solution that allows measuring signal intensity, in addition to allowing integration with other sensors for future developments.	Evolution
RNF-004	The reliability of the technological solution must be guaranteed.	A technological solution with high reliability is sought. For this reason, the hardware used must be stable and robust, with minimal malfunctions and long life of its components.	Evolution

According to [15], the UML unifies, above all, the 800ch, Rumbaugh (OMT), and Jacobson methods, but its scope will become much broader. At the moment, UML is in the process of standardization with the Object Management Group. Likewise, the author defines UML as a standard language for building software plans. We can divide it into four basic approaches: to visualize, specify, build, and document the artifacts of a system that involves software. In another definition given by [16], UML is a standard that has been adopted internationally by numerous organizations and companies to create diagrams and documentation related to software development (computer programs). It should be clarified that, at this point, we will not focus specifically on the diagrams and documentation of the use cases. It also seems important to know, from the point of view of various experts on the subject, different definitions of what a use case is.

According to [17], a use case is a technique for capturing potential requirements of a new system or software update. Each use case provides one or more scenarios that indicate how the system should interact with the user or with another system to achieve a specific goal. Normally, in use cases, the use of technical jargon is avoided, preferring instead a language closer to the end user.

We intend to make an approach to the reader about the interaction of the different actors of the system with its main processes. To this effect, we propose the presentation of the general diagram of use cases of the proposed technological solution, which can be observed in Fig. 3.

At this point, it is important to break down two of the most important processes in the general use case diagram. To begin with, we want to provide a detailed the process of generation and uploading of the CSV file into the BIGML platform, which can be observed in Fig. 4.

To continue, it is very important to detail the process carried out to evaluate the results obtained from the model, given that, in this process, it is established whether the model meets the initial expectations for the data analysis and its relevance in the object of study. Fig. 5 shows the use case in question.

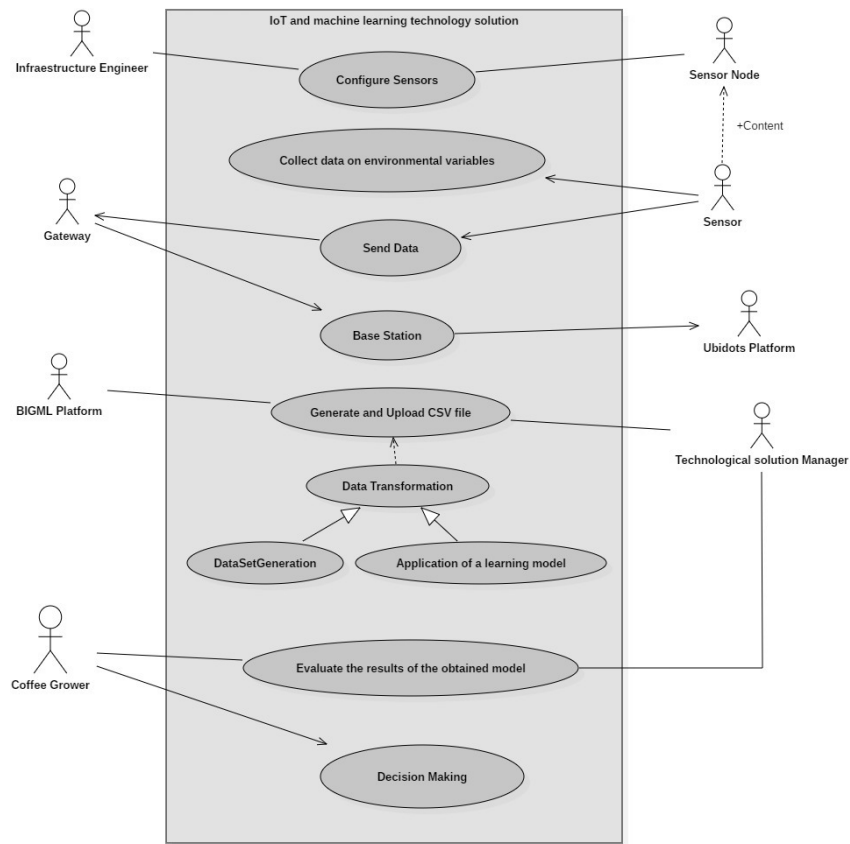


Figure 3. Main use case diagram of the technological solution



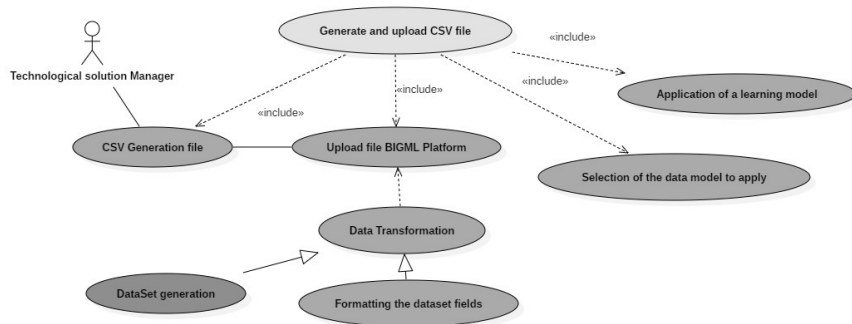


Figure 4. Use case CSV file generation and upload

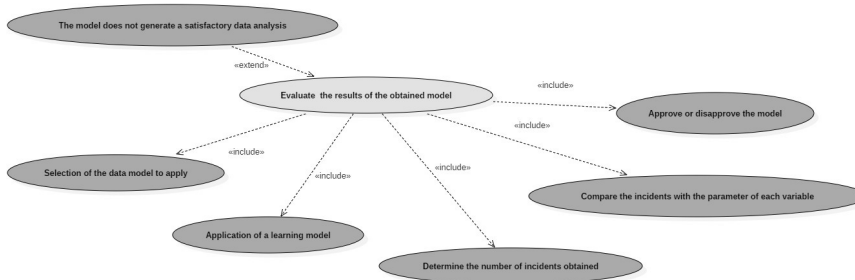


Figure 5. Evaluation of the results obtained from the model

## 2.5. Behavioral modeling

As expressed by [18], behavioral modeling in software development allows determining how certain objects of the system are related and behave. These are not static as in conceptual modeling, but rather have a dynamic behavior. Let us say that I can determine how an object is at a given moment, for example, by sending messages between objects to know its state, which may imply changes in state from one object to another or certain types of activities that a process performs from its beginning to its end. In another definition given by [19], it is emphasized that the objective of dynamic models is to present or describe artifacts that exhibit the behavior of the system over time.

Taking this concept into account, we are interested in knowing which are the components that make up the proposed technological solution at a physical level. For this purpose, we want to present the deployment diagrams, which, as expressed by [20], allow us to represent the hardware structure where our software system will be. To this effect, we can represent each component as nodes. A node is any element that is a hardware resource, that is, it is the generic name for our equipment. Fig. 6 shows the proposed deployment diagram for the technological solution.

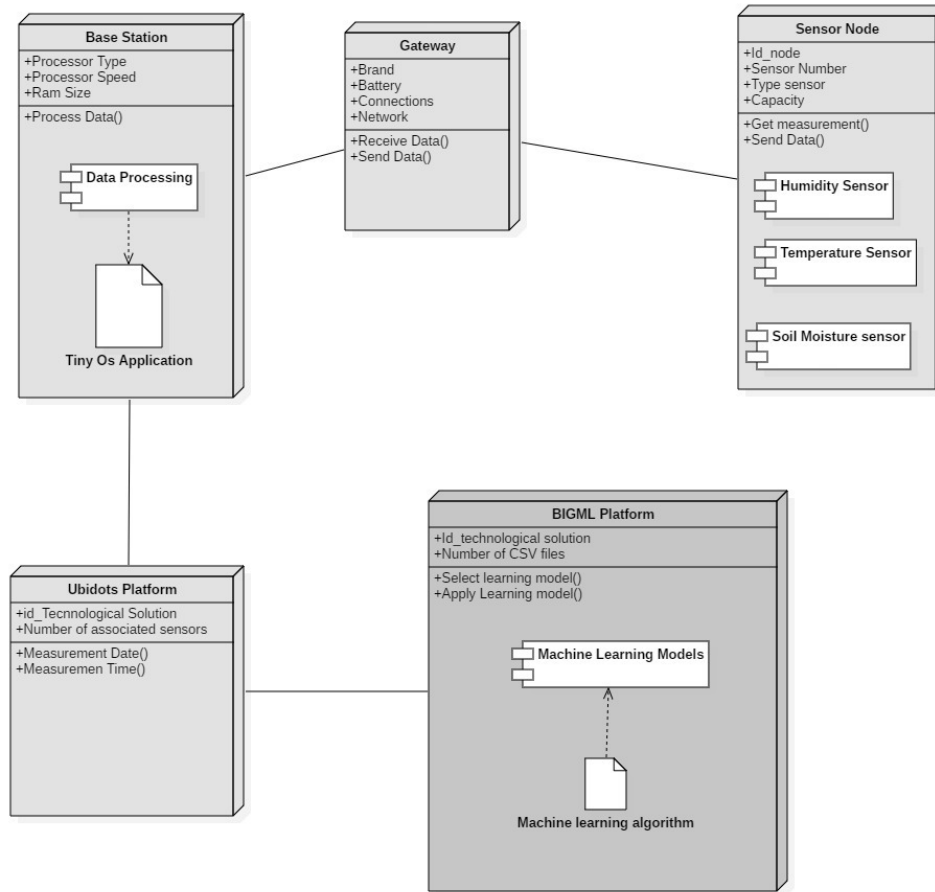


Figure 6. Technological solution deployment diagram

### 3. Results

We were able to determine the importance of knowing, in an organized and detailed way, the functional and non-functional requirements of a technological solution, since the adequate elaboration and documentation of these requirements depends on subsequent phases of the life cycle that continue to work correctly, in line with the objective of the proposed solution.

Through the general use case diagram, we were able to establish the main processes of the proposed technological solution, as well as each of the related actors in each of these processes. This vision is of utmost importance to determine that the functional requirements of the system are fulfilled in accordance with what is requested by the interested parties of the project. Likewise, the use sub-cases allowed knowing each of the different sub-processes involved in the project, such as the

generation and uploading of CSV files, which constitute main input for data analysis on the BIGML platform. Once the data is loaded there, it undergoes a transformation process into the platform's own formats, and then a learning model is selected and applied. In the other process, the machine learning applied to said data was examined, and it was evaluated whether the obtained results were in accordance with the established parameters.

On the other hand, the deployment diagram allowed us to thoroughly understand the operation of the components, not only of the hardware, but also of the software involved in the proposed technological solution. This is of great importance to understand what happens with the data collected, sent, and processed at a specific moment, and it allows us to have a more detailed view of each component and its interaction in the system.

We were able to appreciate the importance of a modeling language like UML, since it allowed examining the processes and interactions in the system from different perspectives, in addition to identifying the relationships between users and processes.

One of the great advantages of UML is that it can be used and applied in all stages of the life cycle of a technology system, from modeling to validation testing. Another of its great advantages is that it is able to determine the feasibility of a proposal or project in advance, which allows us to financially demonstrate to investors that the idea to be presented brings value to the business.

In this part of the results, we focus more on the obvious advantages of using software engineering through UML modeling than on figures or performance statistics that are not the central object of study. It was possible to show that the application of software engineering through UML modeling allows showing aspects of great importance in the technological solution, such as the different actors involved in the processes through use cases. In the same way, it is possible to obtain vision of the interaction between the different hardware and software components of the solution and understand aspects such as communication between these devices.

Through the conceptual modeling of the technological solution, we were able to identify the most relevant processes that allow us to know what is the basic operation of the solution and the Man-Machine and Machine-machine interactions that are presented.

Equally interesting is that the reader can know, at least in general, the non-functional requirements of the system, which are often more important than the functional requirements themselves. Table II talks about the scalability of the solution that, for now, covers 300 linear meters, but that can be expanded to improve the coverage of the land when deemed necessary. This principle of scalability is very important when considering the development of an IoT solution.

## 4. Conclusions

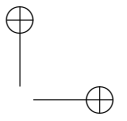
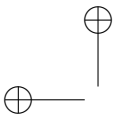
It is important to know the technological aspects of a system, solution, or technological application, but software engineering allows us to delve into more specific details and learn about aspects of great importance in the conceptual and behavioral modeling of a certain software artifact.

Another aspect of great importance is being able to thoroughly understand the functional and non-functional requirements of a system or technological solution, since, many times, by not considering non-functional requirements, highly relevant quality attributes are neglected or are not given the adequate importance, for example, the response time of a device or server to a request, or access to unauthorized information.

We were able to identify, at a very reduced scale, the importance of the application of software engineering in a technological solution. On the other hand, we established the importance and great applicability of methodologies such as UML in both static and dynamic views of a system.

## References

- [1] M. Rossainz-López, *Diseño orientado a objetos*, México D.F., México: Universidad Autónoma de Puebla, 2012. ↑466
- [2] B. Boehm, "A view of 20th and 21st century software engineering," in *28th Int. Conf. Soft. Eng. (ICSE '06)*, Shanghai, China, May 2006. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.97.4717&rep=rep1&type=pdf> ↑466
- [3] IEEE, *IEEE Guide to Software Design Descriptions*, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993. ↑466
- [4] C. Larman, *UML y patrones*, Madrid: Pearson, 2003. ↑467
- [5] J. Rumbaugh, I. Jacobson, and G. Booch, *El lenguaje unificado de modelado: manual de referencia*, Madrid: Addison Wesley, 2000. ↑467
- [6] L. Ramírez, "Diseño de una arquitectura para redes de sensores con soporte para aplicaciones de detección de eventos," Doctoral Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, 2012. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15152/tesisUPV3764.pdf> ↑469
- [7] N. D. Castro C, L. E. Chamorro F, and C. A. Viteri M, "Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado," *Revista de ciencias agrícolas*, vol. 33, nº 2, pp. 106-116, Aug. 2016. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.57> ↑469
- [8] K. E Kendall and J. E Kendall, *Análisis y diseño de sistemas*, Mexico D.F., México: Prentice Hall, 2011. ↑470
- [9] E. Rozic and S. Herzovich, *UML y desarrollo de software orientado a objetos*, México D.F., México: Universidad de San Andrés, 2016. ↑470
- [10] R. Yeh and P. Zave, "Specifying Software Requirements," *Proc. IEEE*, vol. 68, no. 9, pp. 1077-1085, 1980. <https://doi.org/10.1109/PROC.1980.11806> ↑470
- [11] B. Boehm, "Software Engineering," *IEEE Trans. Comp.*, vol. 25, no. 12, pp. 1226-1241, Dec. 1976. <https://doi.org/10.1109/TC.1976.1674590> ↑470
- [12] A. N. Camacho-Zambrano, "Herramienta para el análisis de requerimientos dentro de la pequeña empresa desarrolladora de software en Bogotá D.C.," Undergraduate Thesis, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia, 2005. <http://hdl.handle.net/10554/7480> ↑470
- [13] R. Pressman, *Ingeniería del software un enfoque práctico*, Bogotá D.C., Colombia: McGraw Hill, 2010. ↑470
- [14] E. J. Naiburg and R. A. Maksimchuk, *UML For Database Design*, New York, NY, USA: Addison-Wesley Publishing Company, 2001. ↑470
- [15] M. Fewler, *UML Gota a Gota*, México D.F., México: Pearson Educación, 1999. ↑472
- [16] C. Krall, "aprenderaprogramar.com," <https://bit.ly/3srfpe9> (accessed Apr. 10, 2021). ↑472
- [17] E. Kendall and J. Kendall, *Análisis y diseño de sistemas*, México D.F.: Pearson Educación, 2011. ↑472
- [18] J. Schmuller, *Aprendiendo UML en 24 horas*, México D.F., México: Pearson, 2000. ↑474
- [19] Universidad Carlos III de Madrid, *Modelado dinámico básico*, Madrid, Spain: Universidad Carlos III de Madrid, 2018. ↑474
- [20] K. Cevallos, «Ingeniería del software,» <https://bit.ly/3ah5xgw> (accessed Apr 12, 2021). ↑474



---

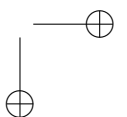
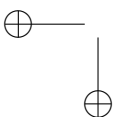
**William Ruiz Martínez**

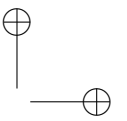
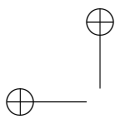
Master's degree in Strategic Management of Software Engineering, UNINI University of Puerto Rico. Project Management Specialist, Universidad Autónoma de Colombia. Systems Engineer, Universidad Autónoma de Colombia. Full-time professor at Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). He belongs to the AXON group as a researcher, classified in category A by Colciencias.  
Email: [william\\_ruizmar@cun.edu.co](mailto:william_ruizmar@cun.edu.co)

---

**Arnaldo Andres González Gómez**

Electronic engineer from Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Full-time professor at Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). He belongs to the AXON group as a researcher, classified in category A by Colciencias.  
Email: [arnaldo\\_gonzalez@cun.edu.co](mailto:arnaldo_gonzalez@cun.edu.co)





Research

REVISTA  
Ingeniería

## Extraordinary Passive Safety in Cars Using a Sensor Network Model

*Seguridad pasiva extraordinaria en automóviles usando un modelo de red de sensores*

**Sergio Ruiz<sup>1</sup>, Farid García<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Texcoco, Texcoco, Estado de México, México.

Correspondence e-mail: [jsgerioruizc@gmail.com](mailto:jsgerioruizc@gmail.com)

Recibido: 15/08/2021. Modificado: 27/08/2021. Aceptado: 15/09/2021.

### Abstract

**Context:** The automobile industry has included active and passive safety. Active safety incorporates elements to avoid crashes and collisions. Some elements are ABS brakes and stabilization bars, among others. On the other hand, passive safety avoids or minimizes damage to the occupants in the event of an accident. Some passive safety features include seat belts and front and curtain airbags for the driver and other occupants.

**Method:** In this research work, we propose a new category called Extraordinary Passive Safety (XPS). A model of a sensor network was designed to inspect the conditions inside the car to detect fire, smoke, gases, and extreme temperatures. The sensors send data to a device (DXPS) capable of receiving and storing the data.

**Results:** Each sensor collects data and sends it to the DXPS every period. The sensor sends 0s while there is no risk, and 1s when it detects a risk. When the DXPS receives a 1, the pattern is evaluated, and the risk is identified. Since there are several sensors, the reading pattern is a set of 0s (000000). When a pattern with one or more 1s (000100, 010101) is received, the DXPS can send an alert or activate a device.

**Conclusions:** The proposed solution could save the lives of children left in the car or people trapped when the car catches fire. As future work, it is intended to define the devices to avoid or minimize damage to the occupants such as oxygen supply, gas extraction, regulating the temperature, among others.

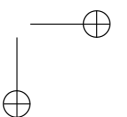
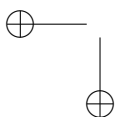
**Keywords:** automobile, sensor network, active safety, passive safety, extraordinary passive safety

**Language:** English

Open access



Cite this paper as: S. Ruiz, F. García: Extraordinary passive safety in cars using a sensor network model. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 479:492. © The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://doi.org/10.14483/23448393.18493>



### Resumen

**Contexto:** La industria de los automóviles ha incluido seguridad activa y pasiva. La seguridad activa incorpora elementos para evitar choques y colisiones. Algunos elementos son frenos ABS y barras de estabilización, entre otros. Por otro lado, la seguridad pasiva evita o minimiza daños a los ocupantes en caso de haber un accidente. Algunos elementos de seguridad pasiva son los cinturones de seguridad y bolsas de aire, así como de cortina para el conductor y otros ocupantes.

**Método:** En este trabajo de investigación se propone una nueva categoría llamada seguridad pasiva extraordinaria (SPX). Se definió un modelo de una red de sensores para censar las condiciones del interior del automóvil para detectar fuego, humo, gases y temperaturas extremas. Los sensores envían datos a un dispositivo capaz de recibir y almacenar los datos.

**Resultados:** Cada sensor obtiene datos y los envía al dispositivo cada periodo de tiempo. El sensor envía 0s mientras no exista riesgo; al detectar un riesgo envía un 1. Cuando el dispositivo recibe un 1, se evalúa el patrón y se determina el riesgo. Dado que hay varios sensores, el patrón de lectura es un conjunto de 0 (000000). Cuando se recibe un patrón con uno o más ceros (000100, 010101) se puede activar una alarma o activar un dispositivo.

**Conclusiones:** La solución propuesta podría salvar vidas de niños dejados en el automóvil o personas atrapadas al incendiarse el automóvil. Como trabajo futuro se pretenden definir los dispositivos para evitar o minimizar los daños a los ocupantes como suministro de oxígeno, extracción de gases, regulación de la temperatura, ente otros.

**Palabras clave:** automóvil, red de sensores, seguridad activa, seguridad pasiva, seguridad pasiva extraordinaria

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

### 1.1. Automobiles

Human beings require safe places, such as their home, office, and car. We spend most of the day in these places. A person or family travel inside a car, or the driver and passengers in the case of a public transport car. There are cars of different sizes and shapes. In this research work, we focus on cars with up to five passengers

The car has a cabin with seating for five passengers, where the front seats are for the driver and co-pilot and the rear seats are for the other three passengers. Babies have special seats attached to a back seat, and all passengers must wear a seat belt.

However, there are additional risks while the car is traveling or parked. This paper calls them Extraordinary Risks (XR). In order to mitigate XR, an extraordinary security sensor network (XSSN) connected to a Device of Extraordinary Passive Safety (DXPS) is proposed.

The risks considered for the occupants of the car are fire, accumulation of gases, and extreme temperature. These risks can cause suffocation, burns, poisoning, dehydration, or hypothermia.

### 1.1.1. Active safety

Active Safety (AS) is a set of devices in the car with the purpose of preventing accidents such as collisions or rollovers. Devices have been implemented to avoid running over pedestrians or cyclists [1], [2]. Other devices are in charge of the speed census, the distance between vehicles, and communication between vehicles before reaching an intersection for the emission of danger messages [3]. Static and dynamic environments can be monitored by implementing dynamic sensors, cameras, infrared rays, and radars. Monitoring makes it possible to implement dynamic actuators, and census data can be concentrated in a sensor control center [1], [2]. The monitoring uses algorithms for object identification and corner and edge detection. These algorithms use the following techniques of: Classification, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbors, and Convolutional Neural Networks (SVM, KNN, and CNN) [2].

### 1.1.2. Passive safety

Passive safety aims to minimize potential injuries to occupants. Airbags are placed to save lives and react after 30,000 milliseconds. Other accessories are seat belts and seats for babies. Occupants can be protected by passive safety by 84-96 % [4]. Seat belts are individual and activate in 20,000 milliseconds to support the occupant. Even seat belts with a pneumatic system have been proposed for greater effectiveness. Accidents are severe or fatal up to 40 % of the time [5]. 13 % of collisions can happen from the front and 14 % from the side. Crashes can cause injuries to the head, abdomen, and spine of the occupants [6].

## 1.2. Risks

### 1.2.1. Risk of fire

Systems have been proposed for the detection of fire inside automobiles using fuzzy logic, where multiple detectors have achieved an efficiency of up to 95 % [7]. In other cases, elements that extinguish fire have been proposed. This must be done without the occupants since there is risk of explosion [8]. In other cases, fire detection is aimed towards prevention while the car is filling up with gasoline at a fuel station. Recommendations and strategies have been provided to mitigate the fire. [9].

### 1.2.2. Choking and poisoning risks

Research works are focused on fire cases inside a tunnel. A fire inside a tunnel generates accumulation of gases, which can cause poisoning, suffocation and even death to the occupants of cars when accumulated in a tunnel. Poisoning or death can be avoided if there are escape routes or mechanisms to mitigate gases within the tunnel. No measure implemented in automobiles is mentioned to help occupants in such cases [10], [11].

### 1.2.3. Risks of dehydration and hypothermia

Children 1 to 3 years old are the most vulnerable to being trapped in closed cars, which can result in dehydration and death [12]. The heat inside a car affects from 30 °C. However, inside a car, the



temperature with the windows closed can reach 56-68 °C. Children trapped or asleep inside a car have died from the high temperatures. In other cases, extreme cold has caused hypothermia in the occupants [13].

### 1.3. Sensors

#### 1.3.1. Fire sensors

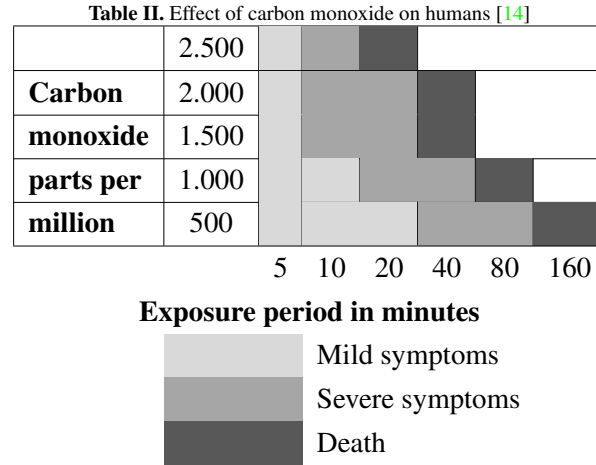
There are multiple types of smoke, heat, and fire sensors, which work in different scenarios. Some sensors are mentioned to show their function and characteristics in Table I.

**Table I.** Smoke and fire sensors

Description
a) <i>AVENAR detector 4000</i> : This sensor is highly reliable and accurate thanks to Intelligent Signal Processing (ISP). It performs the earliest detection of the lightest smoke with double optics versions (Dual-Ray technology). It monitors the environment for electromagnetic influence and quick root cause analysis. It has automatic and manual steering settings.
b) <i>Flame detector, IR3</i> : It is sensitive to flames from 0,1 to 25 m <sup>2</sup> according to EN 54-10 Class 1. It has a low risk of false alarms due to different infrared wavelengths and a combination of filters and signal processing techniques. It operates reliably, even if the lens is contaminated by a film of oil, dust, water vapor, or ice. The response time is selectable, and it is equipped with a 2- or 4-wire configuration via DIP switch setting.
c) <i>On airplanes</i> : When an aircraft has 20 or more seats, by law, there must also be fire detection and extinguishing elements. If smoke/fire is detected in these places, a detection system generates signals to the pilots in the cockpit or an alarm and light signals for the cabin crew. The detector is always on the ceiling of the sinks. In case of fire, the extinguisher bottle discharges automatically [15].

#### 1.3.2. Gas accumulation sensors

Gases in air are as follows: Nitrogen, N<sub>2</sub> (78,084 %); Oxygen, O<sub>2</sub> (20,9476 %); Argon, A (0,934 %); Carbon dioxide, CO<sub>2</sub> (0,0314 %); Neon, Ne (0,001818 %); Methane, CH<sub>4</sub> (0,0002 %); Helium, He (0,000524 %); Krypton, Kr (0,000114 %); Hydrogen, H<sub>2</sub> (0,00005 %); Xenon, Xe (0,0000087 %). The characteristics of gases indicate that they can be lighter, heavier, or have the same density as air. Gases may have an odor or be odorless, as well as colored or colorless. Some gases cannot be seen, smelled, or touched. There are four types of risks with gases as follows: flammable, toxic gas; asphyxiating, risk of fire and/or explosion. For example, methane, butane, and propane are associated with poisoning hazard; and carbon monoxide, hydrogen, and chlorine with choking hazard. Another risk is the lack of oxygen, which can be consumed or replaced by another gas. Choking hazard can result from a lack of oxygen. Humans need to breathe O<sub>2</sub> in the air to live. Normal ambient air contains an oxygen concentration of 20,9 % v/v. When the oxygen level falls below 19,5 % v/v, the air is considered oxygen deficient. Oxygen concentrations below 16 % v/v are not considered safe for humans. At a level of 16 % a human suffers from exhaustion, but 6 % is fatal. The details of this are shown in Table II.



To detect the accumulation of gases in a closed environment, there are various types of sensors [14]. Some Honeywell sensors are shown in Table III.

**Table III.** Gas detector sensors

Characteristics
a) <i>Gama Signalpoint</i> : Toxic gas and oxygen detectors are designed for use in non-explosive atmospheres. They have 2 conductors, 4-20mA, fed by the cable and can be used with a PLC or with corresponding gas control systems.
b) <i>Gama Sensepoint</i> : These ATEX certified flammable, toxic and oxygen gas detectors offer a high-quality, cost-effective solution for monitoring hazardous areas.
c) <i>Transmisor MkII and MkIII Serie 3000 with sensor</i> : The oxygen and toxic gas detector are wired by two wires. Detector is used in potentially explosive atmospheres [2].

### 1.3.3. Temperature sensors

Thermometers are suitable for outdoor and indoor use. In this case, a car cabin is a closed area, for which there are several models. Table IV shows some of them.

**Table IV.** Temperature sensors

Description
a) <i>DC 6V-30V 3-in-1 Digital Clock</i> : it has a voltage thermometer and voltmeter, a LED display, an IP67 waterproof tester. This thermometer is for cars and boats.
b) <i>Car Digital Clock on the display</i> : Automatic Electronic Thermometer, LED Backlight, Digital Display.
c) <i>Mini Electronic Digital Car Dashboard Clock</i> : it has a durable, convenient self-adhesive mount for trucks.

Today's cars have a thermometer that reflects the temperature of the environment, but it does not accurately measure the temperature inside the car. However, there are industrial models that can send or store the temperature of a closed environment. The objective of a thermometer in the cabin is to measure the temperature and detect extreme temperatures (very low or very high) that may endanger the occupants.

#### 1.4. State of the art

[8] addresses the problem of car fires. Most cars catch fire while refueling at a gas station. The problem is that, after the car fire, an explosion can occur. Other sources of fire can be high temperatures, friction, and the accumulation of gases. Therefore, there should be measures for the evacuation of the occupants to safety. Gas stations must have the means to handle a car fire emergency. In this case, a fire can occur while the car is stopped.

[16] focuses on the automation of fire prevention in cars. The authors seek to detect and extinguish the fire quickly and early while keeping the car and the occupants safe. Their proposal involves an automated extinguishing method, as well as smoke or flame sensors to emit an alarm and activate automated extinction. Finally, the flow of fuel and electricity could be stopped to minimize the risks.

A system can sound an alarm when a locked child is in danger. [17] Proposes to avoid heat shocks, hypothermia, and suffocation of children trapped in a closed and parked car. An average of 37 children dies each year in India from these causes. Another problem is the decrease in oxygen when it goes below 15 %, which makes it highly dangerous. The use of CO<sub>2</sub> and temperature sensors is proposed to detect critical levels. Critical values are 550 parts per million of CO<sub>2</sub> and 40 °C. Once critical levels are detected, a message is sent to the adult responsible for the vehicle. This work does not propose a solution if there is no response from the driver.

The temperature in the cabin of a car parked under the sun's rays can reach heat or cold extremes. The temperature rises more than outside due to the greenhouse effect. The temperature under the sun can range from 41 to 76 °C, and it can drop to -19 °C. Therefore, trapped pets and children have died. Children become dehydrated faster than adults. The recommendations that were issued are: avoid parking the car under the sun's rays and do not leave children locked inside [17].

Cold is also a problem in parked cars in certain parts of the world. The work by [19] focuses on showing a statistic of children who have suffered hypothermia between 1999 and 2007 in the United States. The authors found that 231 children aged one to 14 died of hypothermia in a car. More than 80 % of cases were due to unattended children. 25 % occurred while playing. 35 % of cases involved children under one year old and 60 % from 1 to 4 years old. 33 % were in the care of the mother and 23 % in the care of the father. Moreover, -21 °C for at least 15 minutes can be fatal.

An alert can be installed to warn of the risk of hypothermia, as presented in [20]. From 1998 to 2012, 530 children have died from hypothermia. Some of these deaths occurred in the South, followed by the West, Midwest, and Northeast from United States. A temperature of 6,5 °C is fatal for a child in a car. A child is more affected than an adult by the cold due to body mass and composition.

The proposal is based on a temperature sensor and a motion sensor, as well as an Arduino board, to detect the presence of the child. Once a risk level is detected, an alert is sent to a caregiver application. The proposed solution is to open the window a little remotely. However, it is considered that the measure is not sufficient because it depends on the correct operation of the application.

Passive safety in the future must be improved and adapted to new conditions. In this case, [8] present a work in which they try to predict the possible risks that the occupants of a car could suffer and generate measures to mitigate the risks. Most crashes are head-on and cause damage to the thorax and spine of the occupants. Using a crash history, it is possible to predict a crash and the injuries that the occupants may sustain.

## 2. Methodology

### 2.1. Cabin dimensions

In this research work, we focus on cars with up to five passengers, which are mostly cars of the sedan and hatchback type. Both types of cars have similarities at the front and some differences at the rear. However, it is the same pattern for passengers: driver, co-pilot, and three occupants in the rear seats. Each passenger has space to sit and for their feet, as well as a distance from the head to the roof of the car.

For the sake of clarity, the places of the passengers have been numbered according to the place of precedence they occupy in the car. The places inside the car are numbered 1 through 5: place 1 is behind the driver, place 2 is behind the side opposite to the driver, place 3 is back in the middle, place 4 is opposite the driver, and the 5th place is occupied by the driver.

The size of the cabin is different according to the model and make of the car. However, the measurements show similar dimensions. Measurements from a Toyota Corolla were taken, which are shown in millimeters in Table V.

Table V. Interior space of a 2020 *Toyota Corolla*

Interior dimensions (mm)	Measurements in millimeters
Head room	Front 985/946 and rear 963/944
Shoulder room	1.392/1.388
Hip room	1.346/1.115
Leg room	1.059/921

### 2.2. Sensors

The on-board sensors can collect the presence of passengers from any of the five seats, and there are other sensors to register the temperature, toxic gases, and oxygen, as well as smoke and fire. They are shown in Table VI.

**Table VI.** Sensors considered for the proposed model

Sensor	Function
Temperature	Detect extreme hot or cold temperatures
Oxygen	Detect oxygen level
Gas detector	Detect gases that can be toxic
Seat occupancy detector	Detect the presence of occupants
Smoke and fire detector	Detect the presence of fire inside the cabin

### 2.2.1. Sensor network

The sensor network is placed in the dash, on the roof, and on the left and right sides of the car. There is also a sensor in each seat. All sensors are active when the car is in motion or parked. All sensors are connected to the DXPS.

### 2.2.2. Sensor reading

The sensors gather census data and send them to the DXPS each second in different formats, so the inputs are normalized to 0s and 1s. For example, if the temperature is 19 °C, it becomes 0, whereas, if it is -1 °C, it becomes 1 because it represents a risk. In the same way, if the temperature is 41 °C, it becomes a 1.

The data are placed in a vector of 0s and 1s. If the pattern is 000000, it means that there is no risk. Therefore, if the pattern is 000010 there is some risk because there is at least one 1. Each position of the vector corresponds to a sensor and a risk (Table VII).

**Table VII.** Sensor keys as well as the risk they detect

Pattern	Key	Sensor	Risk
0	LTD	Low temperature detector	Risk of hypothermia
0	HTD	High temperature detector	Risk of dehydration
0	OXD	Oxygen detector	Risk of suffocation
0	TGD	Toxic gas detector	Risk of poisoning
0	SMD	Smoke detector	Detect smoke from flammable fires
0	FRD	Fire detector	Detect flames inside the cabin
0	S1D	Seat occupancy detector	
0	S2D	Seat occupancy detector	
0	S3D	Seat occupancy detector	
0	S4D	Seat occupancy detector	
0	S5D	Seat occupancy detector	

A sensor is required in each seat since the objective is the protection of the occupants and the car. When at least one occupant is detected, the sensor network is activated, even when the car is stopped and turned off.

### 2.3. Device of extraordinary passive safety

The DXPS can receive signals and store the risk vector. It must also emit signals or alarms and activate actuators to mitigate the risk. This topic will be part of a future project.

An alternative is to use Internet of Things (IoT) devices: in this case, the connection between the car and the user's cell phone. However, internet coverage is limited in many countries.

## 3. Experimental results

### 3.1. Sensor network

The sensor network must be installed in the car cabin with signal and power lines, which could involve a single harness placed during assembly (Fig. 1).

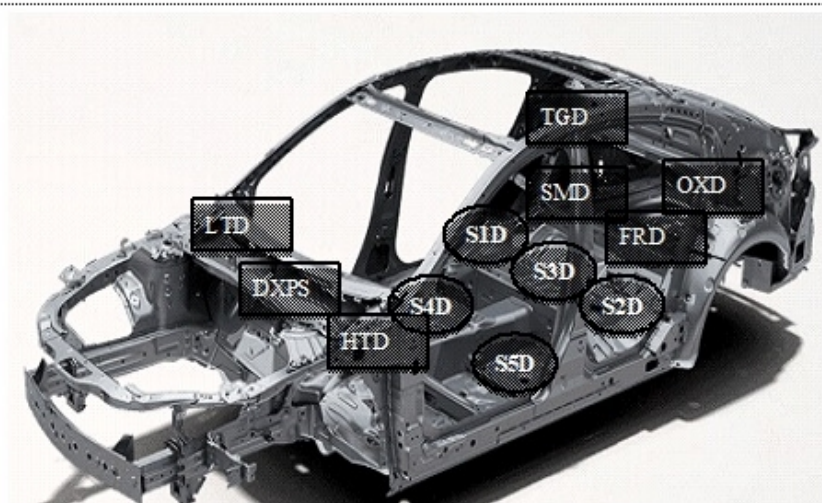


Figure 1. Car chassis [16]

The 2D sensor network map is presented. The sensors are installed during the assembly of the car. For the sake of convenience, the lines go on the floor of the car (Fig. 2).

The sensors are connected to the DXPS. A sensor is intended for each of the seats because there is relevance when there is at least one passenger in the car. The sensor readings and hazard detection sequences are shown in Table VIII.

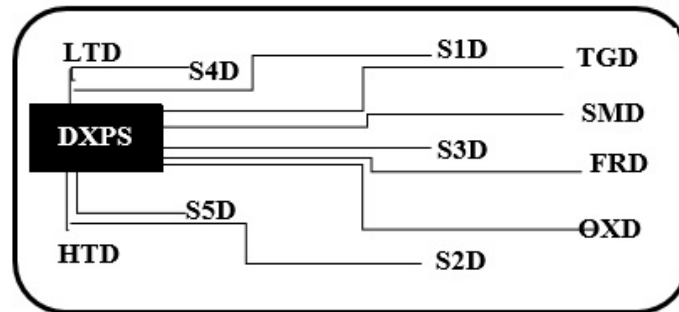


Figure 2. 2D design of the sensor network

Table VIII. Sequence of readings sent to the DXPS

Reading 1	Reading 2	Reading 3	Reading 4	Reading n
05/05/2021	05/05/2021	05/05/2021	05/05/2021	05/05/2021
10:20:00	10:20:00	10:20:02	10:20:02	10:20:04
0000000000	0000000000	0000000000	0000000000	1000001000

According to the readings of the sensors, the possible risks can be determined. Table IX shows the possible scenarios.

Table IX. Possible scenarios according to the detection of a risk

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	None
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	None
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5	None
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	Hypothermia
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	Dehydration or heat stroke
0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	Asphyxia due to lack of oxygen
0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	Toxic gas poisoning
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	Presence of smoke
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	Presence of fire

There are two sets of signals. The first corresponds to the risk sensors and the second to the seat sensors. Eq. (1) determines whether there is a risk, while Eq. (2) determines how many occupants there are in the car.

$$XR = (LTD + HTD + OXD + TGD + SMD + FRD) \quad (1)$$

$$OS = (S1D + S2D + S3D + S4D + S5D) \quad (2)$$

Where XR represents the number of risks, whereas OS refers to the occupants of the car. Therefore, it is necessary to apply an algorithm for risk assessment.

The algorithm required in the DXPS is shown below:

**Algorithm 1** This algorithm is required to detect risks.

```

Begin
# XR are the signals of sensors "000000"
# OS are the signals of seats sensors "00000"
ER = XR + OS # Existence of risk = Extraordinary risk + occupants of seats
if ER = 0 # No risk
if XR >= 1 and OS = 0 # There is risk. Do not board.
print = "Without risk and without occupants"
if XR=0 and OS >=1 or OS <= 5 print = "without risk and with occupants"
if (OS >=1 or OS <= 5) and LTD == 1 print "Risk of hypothermia"
if (OS >=1 or OS <= 5) and HTD == 1 print "Risk of Suffocation"
if (=S >=1 or OS <=5) and OXD == 1 print "Risk of choking"
if (=S >=1 or OS <=5) and TGD == 1 print "Risk of poisoning"
if (=S >=1 or OS <=5) and SMD == 1 print "Risk of fire"
if (=S >=1 or OS <=5) and FRD == 1 print "Risk of burns"
end

```

A state diagram shows the initial state of the sensors (in this case, 0s), as well as the events that generate a sensor state change. After the event, the status changes to value 1 (Fig. 3).

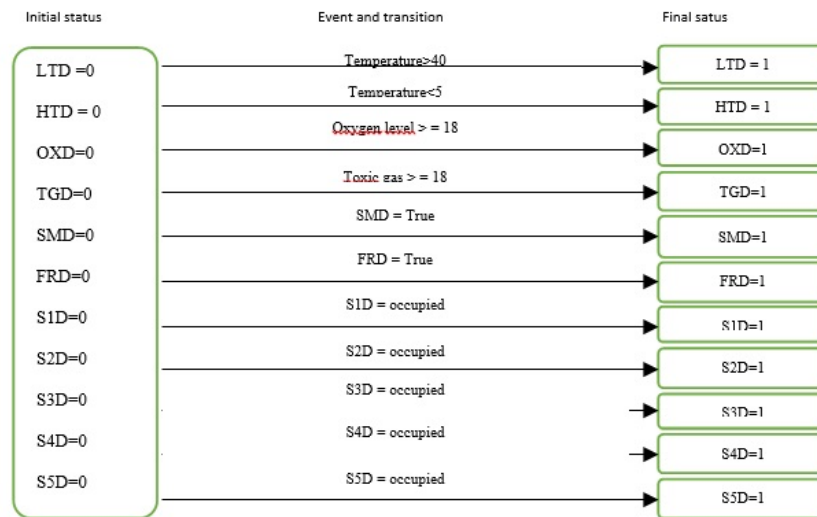


Figure 3. Initial status, events, and final status of the sensors



## 3.2. Discussion

The cost derived from the sensors and the DXPS, as well as their installation, aims to be implemented in mid-range and high-end cars. High-end cars have high-cost accessories and finishes. Therefore, the incorporation of more and better security measures should be considered.

Detecting a risk is not enough for security. It is necessary for the DXPS to send signals to actuators to mitigate the risk. Possible alternatives are: maintaining a temperature that does not endanger the lives of the occupants, having oxygen from the outside or from the inside, extracting toxic gases, and having emergency exits or mitigating the fire.

When a hazard is detected and there are no occupants, an alert must be activated. When opening the car, the occupants should avoid boarding. As a last resort, this consists of blocking the doors to prevent passengers from boarding.

The response of the sensors should occur in one second or less. When an alert is sent, passengers can get out of the car. The possible actuators must be opportune, so as not to risk the health of the occupants.

## 4. Conclusions

It is concluded that the proposed model allows the identification of extraordinary risks. The risks identified are extreme cold, extreme heat, suffocation, poisoning, and fire. This proposal seeks to protect the occupants especially when they are minors, asleep, drunk, unconscious, disabled, or very old. The model can be used to implement devices that avoid or mitigate risks. This solution can especially save children locked in the cabin.

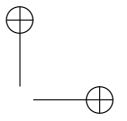
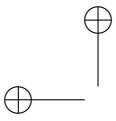
### 4.1. Future research

The project has been planned in three stages. The first stage consists of the design of the sensor network, which is presented in this work. The second stage consists of creating a prototype of the network and obtaining the readings of the sensors. Finally, in the third stage, it is expected to implement the network in a car to carry out the pertinent tests. Through simulations, it will be possible to prove the efficiency of the DXPS.

## References

- [1] H.-Y. Zhang, "The research about fire prevention of vehicle refueling station", *Procedia Engineering*, no. 71, pp. 385-389, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.055> ↑481
- [2] Honeywell, *El libro del gas*, North Carolina, USA: Honeywell, 2013. <https://www.honeywellanalytics.com> ↑481, 483
- [3] T. Giebel, M. M. Meinecke, M. A. Obojsky, M. Gonter, and U. Widmann, "Current trends in vehicle active safety and driver assistance development," In *FISITA World Autom. Cong.*, Munich, Germany, 2008. ↑481
- [4] R. Sagar, "Making cars safer through technology innovation," Texas Instruments, 2017. [https://www.ti.com/lit/wp/sszy009a/sszy009a.pdf?ts=1637254963783&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com.mx%252F](https://www.ti.com/lit/wp/sszy009a/sszy009a.pdf?ts=1637254963783&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com.mx%252F) (accessed Apr. 2, 2020). ↑481

- [5] M. Schulze, G. Noecker, and K. Boehm, "PReVENT: A European program to improve active safety" in *5th Int. Conf. Intell. Trans. Sys. Telecom.*, Brest, France, Jun. 2005. [https://www.prevent-ip.org/en/public\\_documents/publications/papers\\_presentations/prevent\\_to\\_improve\\_active\\_safety](https://www.prevent-ip.org/en/public_documents/publications/papers_presentations/prevent_to_improve_active_safety) ↑481
- [6] P. Putham, P. Tahlya, and N. Lubbe, "Active and passive safety passenger car technologies: potentials to save lives in India," in *Int. Res. Counc. Biomech. Inj. (IRCOBI Asia)*, Lonavala, India, Apr. 2018. ↑481
- [7] P. Sabarinath, "Passive Safety System for Side Impact in Cars", *Shanlax Int. J. Arts Sci. Human.*, vol. 7, no. 4, pp. 115-120, 2020. <https://doi.org/10.34293/sijash.v7i4.1623> ↑481
- [8] M. Östling, P. P. Pisharam, H. Jeppsson, and N. Lubbe, "Future passive safety needs: Predicted injury patterns and possible countermeasures", in *14th Int. Symp. Accomp. Ex. Soph. Car Safety Syst.*, Mannheim, Germany, Nov. 2018. ↑481, 484, 485
- [9] S. Robert et al., "Design and implementation of a fire and control system with enhanced security and safety for automobiles using neuro-fuzzy logic," in *IEEE 7th Int. Conf. Adap. Sci. Tech. (ICAST)*, Accra, Ghana, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICASTECH.2018.8507143> ↑481
- [10] H. Yong-Taek, K. Dong-Ho, and K. Sung-Pil, "An experimental study on the automobile engine room fire using the extinguishing agents" *Fire. Sci. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 1-7, Aug. 2014. <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.4.001> ↑481
- [11] J. R. Kuykendall, S. R. Shaw, D. Paustenbach, K. Fehling, S. Kacew, and V. Kabay, "Chemicals presents in automobile traffic tunnels and the possible community health hazards: a review of the literature" *Informa Healthcare*. vol. 21, no. 9, pp. 747-792, Oct. 2009. <https://doi.org/10.1080/08958370802524357> ↑481
- [12] Y. Q. Wang, F. Y. Xia, and X. M. Jiang, "Study on Safety measures against fire in single highway for subtened traffic" *App. Mech. Mat.*, vols. 438-439, pp. 968-974, Oct. 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.438-439.968> ↑481
- [13] R. W. Byard and R. A. James, "Car window entrapment and accidental childhood asphyxia," *J. Paed. Child Health*, vol. 37, no. 2, pp. 201-202, Dec. 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1754.2001.00586.x> ↑482
- [14] C. McLaren, J. Null, and J. Quinn, "Heat stress from enclosed vehicles: moderate ambient temperatures cause significant temperature rise in enclosed vehicles", *Pediatrics*, vol. 116, no. 1, pp. 109-112, 2005. <https://doi.org/10.1542/peds.2004-2368> ↑483
- [15] Bosch, "Bosch commercial products specialized in fire detection and extinguishing," Bosch, 2016. <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2016/02/sistema-de-deteccion-de-fuego-y.html> ↑482
- [16] UFT, "Diseño automotriz", UFT, n.d. <https://dautomotrizuft.weebly.com/chasis.htm> (accessed Jun. 17, 2020). ↑484, 487
- [17] S. Vignesh, V. J. Prakash, K. Dharmaseelan, and K. K. Bharathi, "Automation on Fire Prevention in Automobile", *Int. J. Res. Eng. Sci. Manage.*, vol. 2, no. 5, pp. 191-193, May 2019. [https://www.ijresm.com/Vol.2\\_2019/Vol2\\_Iss5\\_May19/IJRESM\\_V2\\_I5\\_44.pdf](https://www.ijresm.com/Vol.2_2019/Vol2_Iss5_May19/IJRESM_V2_I5_44.pdf) ↑484
- [18] J. Horak, I. Schmerold, K. Wimmer, and G. Schaubberger, "Cabin air temperature of parked vehicles in summer conditions: life-threatening environment for children and pets calculated by a dynamic model", *Theor. App. Climatouftl.*, no. 130, pp. 107-118, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1861-3> ↑
- [19] K. Rathi and J. Gupta, "Vehicular child trap alert system", *Int. J. Elec. Electr. Comp.*, vol. 4, no. 3 pp. 63- 66, May-Jun. 2019. [http://eecjournal.com/uploads/issue\\_files/1-EEC-MAY-2019-3-Vehicular.pdf](http://eecjournal.com/uploads/issue_files/1-EEC-MAY-2019-3-Vehicular.pdf) ↑484
- [20] J. N. Booth III, G. G. David, J. Waterbor, and G. McGwin Jr., "Hyperthermia deaths among children in parked vehicles", *Forensic Sci. Med. Pathol.*, no. 6, pp. 99-105, Mar. 2010. <https://doi.org/10.1007/s12024-010-9149-x> ↑
- [21] F. Maysoon, A. Aldahiri, H. Alkhatabi, H. Alonezi, L. Mulla, and S. Razzaq, "Sensor based hyperthermia alert car application", *Comm. App. Elec.*, vol. 5, n° 2, pp. 44-55, May 2016. <https://doi.org/10.5120/cae2016652232> ↑



---

**José-Sergio Ruiz-Castilla**

Dr. José Sergio Ruiz Castilla is a Professor-Researcher at Universidad Autónoma del Estado de México. He also does research and writes about Software Engineering and Artificial Intelligence. He collaborates with the Master's and Doctoral programs in Computer Science.

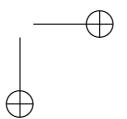
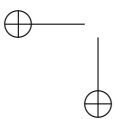
Email: [jsergioruizc@gmail.com](mailto:jsergioruizc@gmail.com)

---

**Farid García-Lamont**

Dr. Farid García Lamont is a Professor-Researcher at Universidad Autónoma del Estado de México. He is at level I in the National System of Researchers. He also does research and writes about Software Engineering and Artificial Intelligence. Finally, he collaborates with the Master's and Doctoral programs in Computer Science.

Email: [fglamont@yahoo.com.mx](mailto:fglamont@yahoo.com.mx)





## Instrucciones para los Autores

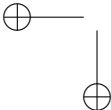
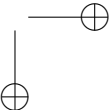
### Introducción

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

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

### Clasificación de los artículos

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

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



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

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

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

## Procedimiento para el envío de artículos

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

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

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

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

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

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

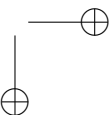
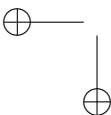
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

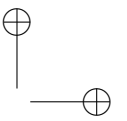
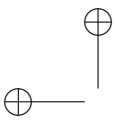
- Debe tener al menos título de maestría.
- Pertener a una institución diferente a la de los autores.
- Haber realizado publicaciones en los últimos tres años.

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

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

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



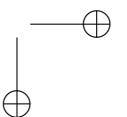
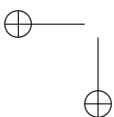


### **Aspectos a tener en cuenta**

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

### **Derechos de autor**

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





## Instructions for authors

### Aim and scope

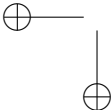
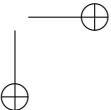
INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished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

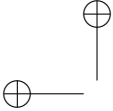
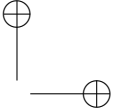
The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

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

### Types of papers

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

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

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

## Procedure for the submission of papers

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Must have a PhD. Degree

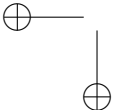
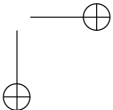
- Must belong to an institution other than the authors'

- Have publications in recognised journals in the last two years

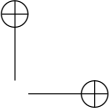
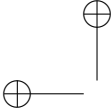
- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

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

## Additional considerations

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





## **Copyright and publishing cost**

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

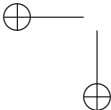
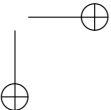
## **Code of good conduct in scientific publishing**

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

## **Inappropriate behaviour not tolerated by the journal**

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

## **Penalties for inappropriate behaviour**

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



## **Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication**

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

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript

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

Suspicion of plagiarism in a published paper

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B.0.pdf>

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript

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

Suspicion of a duplicate publication in a published paper

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B.0.pdf>

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

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

