



**TECNOLOGÍA**  
*en marcha*

Revista trimestral  
Enero – Marzo 2021  
Volumen 34 N° 1  
ISSN 0379-3982 / ISSN-E 2215-3241



**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos



**Comisión Editorial**

Ana Ruth Vílchez Rodríguez. Directora.  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León.  
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco  
Facultad de Ingenierías  
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler  
Experimenteller Botanischer Garten  
Georg-August-Universität Göttingen.  
Alemania

Jorge Solano Jiménez  
Instituto Costarricense del Cemento  
y del Concreto

**Edición técnica**

Alexa Ramírez Vega

**Revisión filológica**

Esperanza Buitrago Poveda

**Diseño gráfico**

Felipe Abarca Fedullo

**Diagramación**

Alexa Ramírez Vega

**Diseño de cubierta**

Felipe Abarca Fedullo

**Imagen de cubierta**

<https://www.freeimages.com/>

**Datos de catalogación en publicación**

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica  
de Costa Rica. - Vol. 34-1, Enero-Marzo  
(2020) –Cartago: la Editorial, 2021 –  
Trimestral  
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –  
Publicaciones periódicas CDD:600

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica  
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618

Correo electrónico: [editorial@itcr.ac.cr](mailto:editorial@itcr.ac.cr)

Web: [editorial.tec.ac.cr](http://editorial.tec.ac.cr)

[http://revistas.tec.ac.cr/tec\\_marcha](http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha)



Editorial Tecnológica  
de Costa Rica

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

**Publicación y directorio en catálogos**



# **TECNOLOGÍA** *en marcha*

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| Impacto de las medidas implementadas en la gestión integral de residuos sólidos, en el Tecnológico de Costa Rica<br>Impact of the actions implemented in the integral solid waste management, in the Costa Rican Institute of Technology<br><i>Alina Rodríguez-Rodríguez, Raquel Mejías-Elizondo, Carolina Vindas-Chacón</i> ..... | 3  |
| Tecnología de modulación en el espacio de tiempo-frecuencia ortogonal<br>Orthogonal time frequency space modulation technology<br><i>Rodrigo Castillo-Rodríguez</i> .....  | 16 |
| Anticuerpos monoclonales y el tratamiento del lupus eritematoso sistémico<br>Monoclonal antibodies and the treatment of systemic lupus erythematosus<br><i>Alex Chavarría-Tapia, Ariana Fernández-Corella, Henry Marenco-Acosta, Yorlery Shen Zhou, Malcolm Ugalde-Zumbado, Juan José Mora-Román</i> .....                         | 25 |
| Hybrid storage engine for geospatial data using NoSQL and SQL paradigms<br>Un motor de almacenamiento híbrido para datos geoespaciales integrando los paradigmas NoSQL y SQL<br><i>José A. Herrera-Ramírez, Marlen Treviño-Villalobos, Leonardo Víquez-Acuña</i> .....   | 40 |
| Secuenciación de operaciones por simulación en la empresa Puntadas, S.G.<br>Sequencing of operations by simulation in the company Puntadas, S.G.<br><i>Erik Orozco-Crespo, Neyfe Sablón-Cossío, Yadamy Rodríguez-Sánchez, Jenifer Cristina González-Garzón, Fabiola Sánchez-Galván</i> .....                                       | 56 |
| Biología sintética en la obtención de compuestos de interés para la industria alimentaria<br>Synthetic biology as a tool used to obtain compounds of interest in the food industry<br><i>María Paula Ortuño-Fajardo, Jose Rodolfo Chacón-Halabi, María Paula Flores-Espinoza, Roger Aguilar-Bravo</i> .....                        | 71 |

**Diseño de un plan estratégico de investigación y extensión para la Escuela de Computación del TEC**

Design of a research and extension strategic plan for the School of Computing at TEC

*César Garita-Rodríguez, Mauricio Arroyo-Herrera, Manuel González-Espinoza.....82*

**Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla**

Natural and anthropogenic sources of atmospheric pollution: State of the art of its impact on the physicochemical properties of rain water and fog water

*José Carlos Mora-Barrantes, José Pablo Sibaja- Brenes, Henry Borbón- Alpizar .....94*

**Exposición ocupacional a radiaciones ultravioleta UVA/UVB de los trabajadores agrícolas de la provincia de Cartago, Costa Rica**

Occupational exposure to ultraviolet radiation (UVA/UVB) in agricultural workers in Cartago, Costa Rica

*Tannia Araya-Solano, Esteban Arias-Monge, Andres Robles-Ramírez, Ara Villalobos-Rodríguez..... 106*

**Ajuste de diferentes modelos de crecimiento no lineal al rendimiento de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) a lo largo del ciclo de vida del cultivo, Costa Rica**

Fitting different nonlinear growth models to oil palm (*Elaeis guineensis*) yield along the crop lifecycle, Costa Rica

*Johanna Solórzano-Thompson, Javier Paniagua-Molina, David Barboza-Navarro..... 118*

**Factores ergonómicos de riesgo para los trabajadores agrícolas, en la zona norte de Cartago, Costa Rica**

Ergonomic factors of risk for agricultural workers in the northern area of Cartago, Costa Rica

*Carmen E. Madriz-Quirós, Olga Sánchez-Brenes..... 132*

**Prevención del golpe de ariete mediante el control del tiempo de cierre, al usar válvulas hidráulicas automatizadas**

Prevention of water hammer through control of the closing time, in automated hydraulic valves

*Gregory Guevara-Rodríguez, Adrian Vargas-Obando, Juan Ignacio Quesada-Chanto..... 148*

# Impacto de las medidas implementadas en la gestión integral de residuos sólidos, en el Tecnológico de Costa Rica

## Impact of the actions implemented in the integral solid waste management, in the Costa Rican Institute of Technology




Alina Rodríguez-Rodríguez<sup>1</sup>, Raquel Mejías-Elizondo<sup>2</sup>,  
Carolina Vindas-Chacón<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 30 de octubre de 2019*  
*Fecha de aprobación: 10 de marzo de 2020*

Rodríguez-Rodríguez, A; Mejías-Elizondo, R; Vindas-Chacón, C. Impacto de las medidas implementadas en la gestión integral de residuos sólidos, en el Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 3-15.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4811>



- 1 Ingeniera ambiental. Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: alirodriguez@tec.ac.cr.  
 <https://orcid.org/0000-0003-2115-4976>
- 2 Ingeniera ambiental. Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rmejias@tec.ac.cr.  
 <https://orcid.org/0000-0003-3312-2699>
- 3 Ingeniera Ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: cvindas95@gmail.com.  
 <https://orcid.org/0000-0001-9171-345X>

## Palabras clave

Gestión integral de residuos sólidos; estudio de caracterización de residuos sólidos.

## Resumen

Uno de los mayores retos que enfrenta Costa Rica ante la crisis climática es realizar una adecuada gestión de los residuos, que representan una de las fuentes de emisión de CO<sub>2</sub>e más importante del territorio nacional. Es así como el Instituto Tecnológico de Costa Rica se suma a los esfuerzos del país formulando, desde la Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral, diferentes iniciativas que buscan reducir la cantidad de residuos dispuestos en el relleno sanitario, orientando las acciones no solo a gestionarlos adecuadamente, sino a evitar que estos se continúen produciendo. A partir de un estudio de caracterización de los residuos sólidos ordinarios de la Sede Central, se determinó que en el año 2016 la Universidad envió 124 533 kg al relleno sanitario, de los cuales un 19% correspondía a materiales que podrían haberse valorizado de haberse gestionado por el Centro de Acopio Institucional. De ahí surgió la implementación de estrategias claras y concisas, gracias a lo cual se logró en el año 2018 reducir los residuos plásticos en un 57% y los residuos polilaminados en un 50% ; ambos eran enviados antes al relleno sanitario. Y para el año 2019 se logró disminuir en un 47% la producción per cápita de desechos en las Residencias Estudiantiles, lo cual se tradujo en la disminución de 22 856 kg de CO<sub>2</sub>e, que se evitó emitir a la atmósfera, una acción consecuente con el Sistema de Gestión de la Carbono-Neutralidad, de la Universidad.

## Keywords

Integrated solid waste management; solid waste characterization study.

## Abstract

One of the biggest challenges that Costa Rica is facing due to the climate change is to carry out a proper management of residues, because at the present time they represent one of the most important sources of CO<sub>2</sub>e emissions in the national territory. The Costa Rican Institute of Technology, from the Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral, joins the efforts of the country by formulating different initiatives that seek to reduce the amount of solid waste that is disposed in the landfill, and guiding actions not only to manage them properly, but to prevent its continuing production. In a study of characterization of the ordinary solid waste from the central campus, it was determined that in 2016 the University sent 124 533 kg to the landfill, 19% of which corresponded to recycling materials that could have been managed by the Institutional Collection Center. Thus, via the implementation of clear and concise strategies, in 2018 the University reduced 57% of plastic waste and 50% of poly laminated waste, both sent before to the landfill. Besides, for the year 2019, the per capita waste production of the student residences was reduced by 47%, that means 22 856 kg of CO<sub>2</sub>e less in that year, an action consistent with the Carbon-Neutrality Management System of the University.

## Introducción

Por residuo sólido se entiende aquel material sólido o semisólido que proviene de actividades animales o humanas y que cuyo poseedor debe o requiere deshacerse de él [1], [2]. El acelerado incremento de estos residuos causa serios problemas ambientales, sociales y económicos; se estima que estos ocasionan el 18% de las emisiones antropogénicas de CH<sub>4</sub> del planeta y que su disposición, aun cuando se realice de manera controlada, trae consigo efectos relacionados con la contaminación del suelo y del agua, poniendo en riesgo la salud de las personas y el desarrollo económico de las localidades [3], [4].

## Tipos de residuos sólidos

Las características de los residuos generados varían de una ciudad a otra de acuerdo con las condiciones climáticas, las tendencias de consumo y la economía de los sectores [3]. No obstante, los residuos sólidos pueden ser clasificados según su fuente (domiciliarios, hospitalarios, industriales, comerciales, agropecuarios, de construcción), su naturaleza fisicoquímica, su forma de manejo, la cantidad generada y el nivel de riesgo [2].

## Manejo de residuos sólidos

El manejo de residuos se define como el conjunto de actividades técnicas y operativas que incluye el almacenamiento, la recolección, el transporte, la valorización, el tratamiento y la disposición final de los residuos [5]. Los rellenos sanitarios constituyen uno de los métodos más antiguos y utilizados para la disposición final de residuos en Costa Rica y el mundo. Dicha tecnología consiste en el aislamiento de los residuos sólidos en celdas impermeables dentro de la tierra, las cuales se interconectan por una serie de conductos que permiten la liberación de gases y lixiviados, producto de la descomposición de los materiales dispuestos [6].

Pese a que los rellenos sanitarios deberían constituir la última etapa en el manejo, se ha determinado que reciben hasta el 95% de los residuos sólidos municipales recolectados en el planeta y ocasionan así serios problemas ambientales [4]. En el año 2012, el 26,2% de las emisiones antropogénicas de  $\text{CH}_4$  producidas en Costa Rica se originaron a partir de estos sistemas [7]. En un estudio realizado por Gworek y colaboradores, se les identificó como fuentes potenciales de contaminación por metales pesados [4], y autores como Hezhong *et al.* los describen como uno de los generadores más importantes de emisiones atmosféricas de mercurio [3].

## Gestión Integral de Residuos Sólidos

La legislación costarricense define la Gestión Integral de Residuos (GIR) como “el conjunto articulado e interrelacionado de acciones regulatorias, operativas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación para el manejo de los residuos, desde su generación hasta la disposición final” [1]. Su formulación implica la toma de decisiones estratégicas, tácticas y operativas, en las que factores económicos, ambientales y sociales sean considerados para prevenir efectos nocivos a corto y largo plazo en el medio ambiente y la salud humana [8].

## Estudio de caracterización de residuos sólidos

Para una gestión integral de los residuos sólidos, es necesario conocer su composición y generación. Esta información puede ser obtenida a partir de un estudio de caracterización o composición, el cual comprende todas las acciones emprendidas para conocer las propiedades intrínsecas de un residuo y cómo estas afectan el ambiente donde se encuentra [9]. Existen diversas metodologías que varían según el propósito de la caracterización, las limitaciones de tiempo y de recursos. Sin embargo, un estudio de composición comprende, de manera general, el muestreo de los residuos, seguido de su clasificación y, por último, el manejo y la interpretación de los datos obtenidos [10].

## Situación actual

Según datos del Banco Mundial, en el año 2016 la población del planeta generó cerca de 2,01 billones de toneladas de residuos, y fueron los países más desarrollados los responsables de la mayor producción per cápita. Las proyecciones para el año 2030 estiman que la producción global alcanzará 2,59 billones de toneladas, y para el año 2050 será un 70% mayor con respecto a la generación actual [11].

En Costa Rica, el inadecuado manejo de los residuos constituye buena parte de la problemática ambiental, ya que después del sector energético, es la segunda fuente de emisión de  $\text{CO}_2$  e más importante del país [7]. Para el año 2006 se estimó una producción diaria de 3784 toneladas de residuos ordinarios, lo que se traduce en un aumento de 2,7 veces lo que se generaba en 1991. Esta cifra alcanzó las 4000 toneladas en el año 2014 y desde ese entonces se encuentra en incremento, sin embargo, a un ritmo más desacelerado [12].

Respecto al porcentaje de recuperación, el Ministerio de Salud estimó para el año 2014 que solo el 1,26% de los residuos municipales recolectados lograban ser destinados al reciclaje y el compostaje [13]. Esto significa que el 98,7% terminaba siendo dispuesto en vertederos municipales y rellenos sanitarios, agotando con mayor velocidad la vida útil de estos terrenos y generando importantes cantidades de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y otros compuestos orgánicos volátiles [3].

Mediante la Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos publicada en 2016 el país se ha propuesto metas como aumentar para el año 2021 en un “15% el porcentaje de separación y recuperación de residuos a nivel nacional, para su posterior aprovechamiento” [13]. Asimismo, desde la promulgación de la Ley para la Gestión Integral de Residuos en el 2010, la administración de los residuos en Costa Rica ha mejorado, incorporando el principio de responsabilidad compartida, pero diferenciada, así como, la responsabilidad extendida del productor. Con la publicación de la Ley, se definen los tipos de residuos y se establecen los principios de jerarquización para su gestión integral, tal como se observa en la figura 1 [1].



**Figura 1.** Jerarquización en el manejo de residuos.

Fuente: Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2007

En el caso del Tecnológico de Costa Rica, la Universidad ha sobresalido por su reconocido desempeño ambiental. Sin embargo, asegurar la adecuada gestión de los residuos sólidos sigue siendo parte de los principales retos que afronta. Según Mejías, el 16% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  e que se originan en la Institución provienen de la generación de estos componentes [14].

En el año 2016, se realizó un estudio de generación y composición de los residuos sólidos ordinarios originados en la Sede Central de la Institución, en el cual se determinó que semanalmente se enviaban 2594,45 kg al relleno sanitario, de los cuales solo el 52% correspondían a componentes que no podían ser valorizados, mientras que el 27% se asociaba a residuos biodegradables, el 19% a valorizables y el restante 2% a peligrosos, eléctricos, electrónicos y textiles [15].



En razón de esos resultados, en los últimos años la creación de medidas para asegurar la gestión integral de los residuos sólidos ha sido un eje primordial para la Universidad, pues su implementación no solo lograría reducir los impactos que conlleva la disposición de estos materiales en los rellenos sanitarios, sino que reafirmaría el compromiso del Tecnológico de Costa Rica en formar profesionales con alta conciencia ambiental.

## Materiales y métodos

### Definición del caso estudiado

El estudio se desarrolló en la Sede Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), ubicada en la provincia de Cartago, cantón Central, Costa Rica. Esta es una institución nacional autónoma de educación superior universitaria que tiene como funciones principales la docencia, la investigación y la extensión de la tecnología y la ciencia, para el desarrollo del país.

El campus posee un área de 0,9 km<sup>2</sup>, abarca más de 90 edificios de aulas, estructuras de más de 4 pisos, laboratorios, campos agropecuarios, servicios de alimentación, servicios médicos, espacios administrativos e instalaciones deportivas como gimnasio, cancha multiuso, plaza de fútbol, pista de atletismo, piscina y cancha de béisbol [16].

Según datos brindados por el Departamento de Admisión y Registro, en el año 2016 la población de estudiantes y funcionarios del campus fue de 9424, cifra que disminuyó en el año 2018 a 8670 personas. En el caso de las residencias estudiantiles, se cuantificó una población de 202 estudiantes en el año 2016. Para el año 2018, construido un nuevo edificio, la población se duplicó, de modo que en cada edificio habitaban 192 estudiantes, cifra que se mantuvo en el año 2019.

Desde el año 2013 la Universidad cuenta con la Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral (GASEL), la cual se encarga, entre otras tareas, de diseñar e implementar programas que minimicen o prevengan el impacto ambiental y el riesgo laboral. Como parte de sus objetivos, se encuentra lograr la gestión integral de los residuos sólidos generados en el campus, por ello cuenta con el programa de Manejo de Residuos Institucionales (MADI), mediante el cual se recolectan y gestionan los residuos generados en la Institución.

### Estudio de caracterización de los residuos sólidos ordinarios

El procedimiento se fundamenta en la Metodología para Estudios de Generación y Composición de Residuos Sólidos Ordinarios, presentada en el decreto n.º 37745-S [17]. Para su elaboración se consideraron los residuos sólidos no valorizables recolectados en los 15 contenedores ubicados en el Campus Central, durante una semana lectiva, en el año 2018.

Cabe señalar que para el sector de Residencias Estudiantiles se realizó el estudio primero en el año 2018 y luego en el 2019, dado que en los datos reportados por Calderón en el 2016 no se contempló la construcción de la nueva edificación.

A continuación, se describe el método empleado para la medición de cantidad y composición de los residuos en cada uno de los contenedores:

1. Preparar 10 bolsas plásticas transparentes y resistentes.
2. Recolectar todos los residuos sólidos del contenedor y trasladarlos a un sector cubierto y colocarlos en pavimento o sobre un plástico resistente y de tamaño adecuado para evitar el contacto directo de los residuos sólidos con el suelo.
3. Utilizando una balanza, medir la masa de las bolsas que contienen los residuos y anotar la masa total correspondiente del contenedor.

4. Verter el contenido de las bolsas sobre el área de trabajo formando un montículo.
5. Aplicar el método del cuarteo en caso de que la masa total de los residuos del contenedor supere los 250 kg.
6. Separar los componentes del montículo en bolsas previamente preparadas según las categorías presentadas en el decreto n.º 37745-S, como residuos biodegradables; papel y cartón; plásticos; vidrio; metales; textiles, cuero y hule; polilaminados (Tetra Pak); residuos peligrosos; residuos eléctricos y electrónicos, y otros componentes.
7. Medir y anotar la masa de cada una de las bolsas con las fracciones de los residuos, según la categoría a la que pertenezcan.
8. Dividir el peso neto de cada una de las categorías entre el peso total de la muestra según la ecuación 1. De esta forma se obtiene el porcentaje en peso de cada categoría para el estrato correspondiente en el día de recolección específico.

$$\text{Porcentaje en peso (\%)} = \frac{P_i}{W_t} \cdot 100 \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde

$P_i$ : peso neto de la categoría  $i$  en el estrato

$W_t$ : suma de los pesos de todas las categorías

9. Repetir el procedimiento durante tres días de la semana de muestreo.

Es importante indicar que el procedimiento se realizó tres veces por cada contenedor, debido a que esta es la frecuencia en que los residuos son recolectados durante todas las semanas para ser dirigidos al relleno sanitario, por lo que con ello se pudo determinar la generación semanal.

En el muestreo realizado se utilizó una balanza digital con una incertidumbre de  $\pm 0.01$  y de capacidad máxima de 300 kg. Los muestreos se realizaron los martes, jueves y sábado, y el horario de estudio se estableció para después de las 15:00 por ser la hora en la que los colaboradores de la Unidad de Conserjería cesan sus labores, lo que garantizó que en los contenedores estuvieran todos los residuos sólidos generados durante el día.

### Análisis de la información

Con la finalidad de analizar estadísticamente el comportamiento de la generación de residuos sólidos en cada uno de los contenedores, se realizó un análisis de correlación de multivariantes mediante el método de componentes principales, por medio del Software Minitab, versión 17.1.0. Cabe señalar que en la comparación de los estudios de caracterización para cada año (2018 y 2016) no se consideraron los contenedores de residencias estudiantiles, Comedor A ni Comedor B, dado que estos últimos fueron únicamente cuantificados en el 2018.

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  equivalente se calcularon mediante la ecuación 2, para la cual se utilizó un factor de emisión de  $0,0581 \text{ kg CH}_4/\text{kg}$  de residuos sólidos, según lo reportado por el Instituto Meteorológico Nacional en su novena edición:

$$\text{Emisión} = CG * FE * PCG \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde

CG: kg de residuos sólidos

FE: factor de emisión ( $\text{kg CH}_4/\text{kg}$  de residuos sólidos)

PCG: potencial de calentamiento global para  $\text{CH}_4$

## Resultados

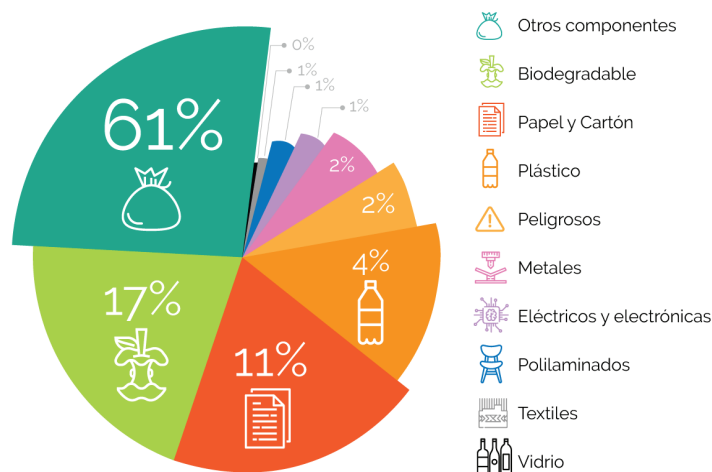
A partir del estudio de caracterización realizado, se obtuvieron los valores indicados en el cuadro 1, los cuales señalan que por semana 2521 kg de residuos fueron enviados al relleno sanitario en el año 2018, lo que representa una producción per cápita de 0,042 kg por día. Este valor es significativamente inferior al reportado en la literatura por instituciones de enseñanza superior como la Universidad Iberoamericana de México y la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador; de la última se reportó la generación de 0,30 kg/persona/día [18]; [19] sin embargo, el valor obtenido en el estudio aquí presentado se asimila a los reportes de la Universidad Nacional de Costa Rica y la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, los cuales indican la generación de 0,042 y 0,052 kg/persona/día respectivamente [20], [21].

**Cuadro 1.** Cantidad de residuos sólidos no valorizables generados  
semanalmente en el Campus Central en el año 2018.

| Categoría                    | Cantidad<br>(kg/<br>semana) | Producción per<br>cápita<br>(kg/persona/día) |
|------------------------------|-----------------------------|--|
| Biodegradable                | 429,760                     | 0,007  |
| Papel y cartón               | 271,620                     | 0,004  |
| Plástico                     | 105,733                     | 0,002  |
| Vidrio                       | 12,095                      | 0,000  |
| Metales                      | 41,888                      | 0,001  |
| Textiles                     | 20,790                      | 0,000  |
| Polilaminados                | 28,195                      | 0,000  |
| Peligrosos                   | 46,820                      | 0,001  |
| Eléctricos y<br>electrónicos | 22,095                      | 0,000  |
| Otros componentes            | 1 541,712                   | 0,025  |
| <b>Total</b>                 | <b>2 520,708</b>            | <b>0,042</b>                                 |

\*Los resultados no incluyen el sector de residencias estudiantiles, este se analizará independientemente más adelante.

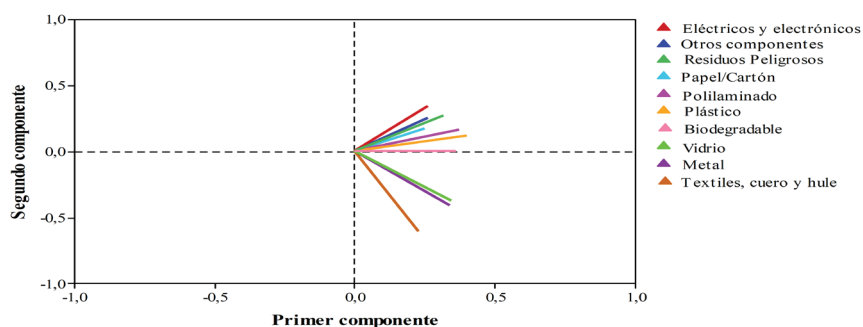
En cuanto a la composición de los residuos, en la figura 2 se aprecia que el mayor porcentaje corresponde a la categoría de “Otros componentes”, los cuales no pueden ser valorizados mediante técnicas de reciclaje ni tratamientos biológicos como el compostaje; por lo tanto, es de esperar que la mayor fracción de residuos correspondan a esta clasificación. Seguidamente, se encuentran los “Residuos biodegradables”, para los cuales GASEL ha iniciado un proyecto piloto que pretende darles tratamiento.



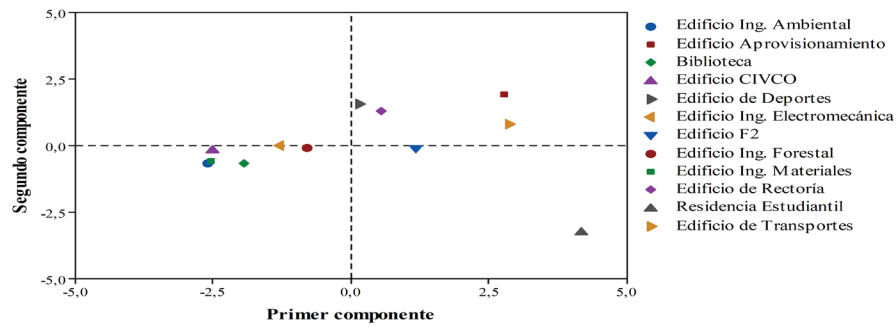
**Figura 2.** Composición de los residuos sólidos no valorizables generados semanalmente en el Campus Central en el año 2018.

Cabe señalar que el porcentaje de generación de residuos plásticos pasó de un 8,1% en el 2016 a un 4% en el 2018, debido a la implementación de medidas como la creación de la directriz de Eliminación de Plástico de un Solo Uso, que prohibió su compra, comercialización y uso, incluyendo los productos elaborados a partir del poliestireno expandido, mejor conocido como estereofón. La aprobación de esta directriz, con la cual se convirtió al ITCR en la primera universidad estatal libre de plástico de un solo uso, ha sido acompañada de capacitaciones y actividades que permiten a la población sustituir el material.

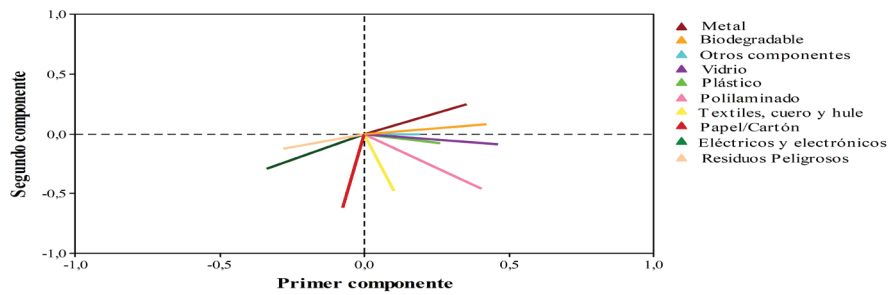
En cuanto a los sectores estudiados, en la figura 3 y la figura 4 se indica que para el año 2016 la mayor cantidad de residuos plásticos se generaban en contenedores cercanos a las sodas estudiantiles, ubicadas cerca de los edificios del Departamento de Aprovisionamiento, el área de Deportes y la Unidad de Transportes. En la figura 5 y la figura 6 se aprecia como este comportamiento cambió en el año 2018 gracias a las medidas mencionadas. Sin embargo, los resultados obtenidos para ese año señalaron que los mayores generadores de plástico en el 2018 fueron las Residencias Estudiantiles y la soda contigua al edificio de Deportes. Para esta última, se encontró que los residuos plásticos correspondían a materiales de embalaje que los operadores de la soda no separaron adecuadamente; de ahí la importancia de realizar estudios de composición de residuos sólidos para lograr identificar los aspectos de mejora.



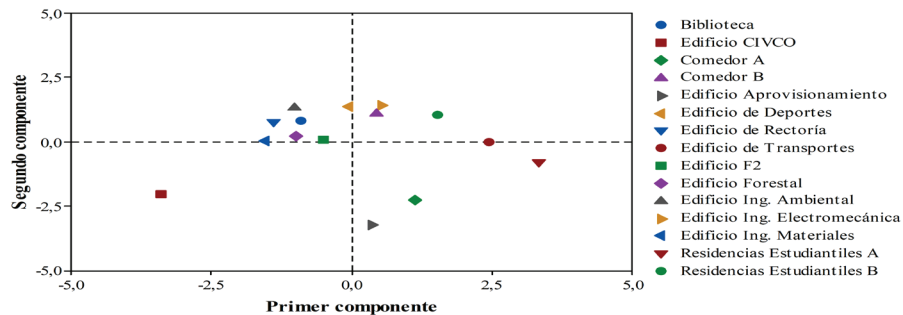
**Figura 3.** Gráfico de cargas relacionadas con los primeros dos componentes del estudio de caracterización del año 2016 “realizado por Vindas [ ]”.



**Figura 4.** Gráfico de puntuaciones para los primeros dos componentes del estudio de caracterización del año 2016 “realizado por Vindas [ ]”.



**Figura 5.** Gráfico de cargas correspondientes a los primeros dos componentes del estudio de caracterización del año 2018 “realizado por Vindas [ ]”



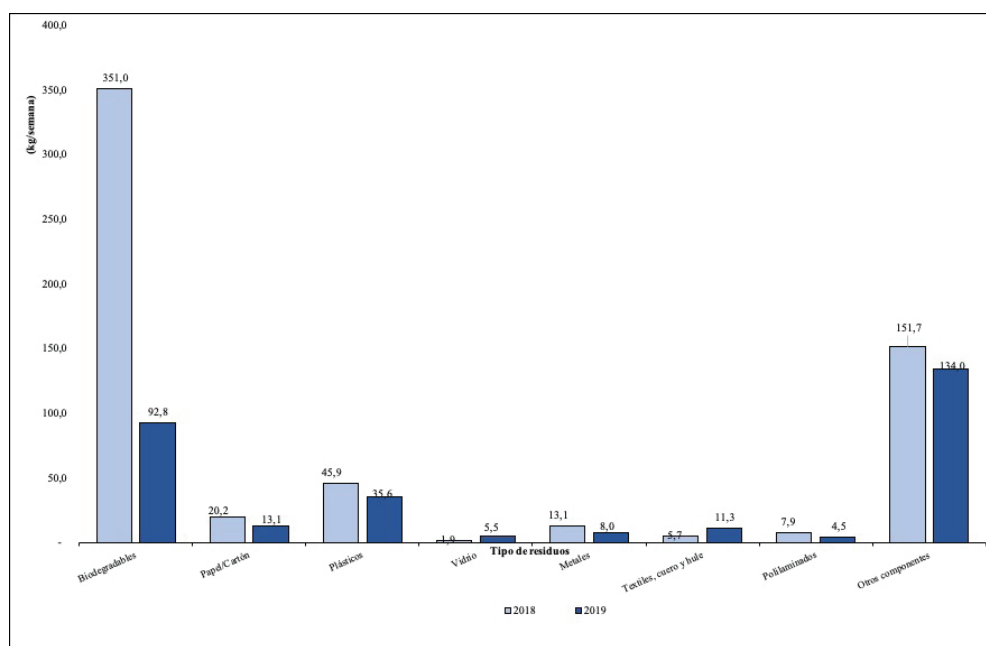
**Figura 6.** Gráfico de puntuaciones para los primeros dos componentes del estudio de caracterización del año 2018 “realizado por Vindas [ ]”.

De manera general se indica en la figura 5 y la figura 6 que residuos valorizables como plástico, polilaminados, vidrio y metal fueron generados de modo correlacionado, pues hubo un ligero aumento en la generación de papel, cartón y vidrio, probablemente a causa de las medidas de sustitución del plástico de un solo uso, y en el caso de los residuos polilaminados, se evidencia una reducción del 50%.

Este análisis de correlación por multivariantes en el 2018 se reportó con un porcentaje de información contenida del 49,6% debido a la variabilidad de los datos obtenidos, mientras que en el 2016 se reportó con un 73,4% de variabilidad.

En cuanto a los desechos generados en las residencias estudiantiles, se encontró que en el año 2018 la generación per cápita fue de 0,216 kg/día, cifra significativamente inferior al promedio nacional de 1,1 kg/persona/día [12], y como resultado de las medidas implementadas en el 2019, la generación per cápita disminuyó todavía más en ese año, a un valor de 0,110 kg/día.

Como se observa en la figura 7, la mayor generación en el sector de residencias estudiantiles corresponde a los residuos biodegradables, los cuales se logró reducir en un 74% gracias a la ejecución de campañas para evitar la pérdida y el desperdicio de alimentos en la Institución, y a la implementación de un programa de separación de orgánicos, específicamente para las residencias. En cuanto a la generación de los residuos valorizables como papel, cartón, plástico, metal y polilaminados, se observa una reducción gracias a campañas de concientización, así como al cambio del etiquetado de todos los contenedores de residuos de la Institución, que ha facilitado la separación en la fuente. Esta disminución representa una reducción anual de 22 856 kg de CO<sub>2</sub> equivalente.



**Figura 7.** Generación de residuos en residencias estudiantiles en el periodo 2018 – 2019.

Cabe señalar que las medidas mencionadas se formularon a partir del estudio de composición de residuos sólidos elaborado por Calderón en el 2016 en el Campus Central [15]. De otras actividades implementadas puede conocerse en el cuadro 2.

**Cuadro 2.** Medidas implementadas en el periodo 2016-2018.

| Medida implementada  | Descripción  |
|--|--|
| Evaluación de puntos de separación e instalación de nuevos puntos                | Anualmente se evalúa la ubicación de los puntos de separación de cartuchos de tinta, baterías, residuos sólidos valorizables y ordinarios, de acuerdo con su utilización en ese periodo. Como resultado, se han instalado nuevos puntos de separación en los lugares en que se han identificado deficiencias y se han eliminado los basureros que entorpecían la adecuada separación de los residuos. Es importante mencionar que esta medida se implementó aunadamente a la eliminación de basureros convencionales en aulas y pasillos. Actualmente el campus cuenta con 113 centros de acopio de materiales (conocidos como baterías de reciclaje) para la separación adecuada de residuos. En el anexo 1 se adjunta el mapa que muestra su distribución. |
| Gestión de residuos especiales, peligrosos y bioinfecciosos                      | La Institución cuenta con un protocolo para manejar los residuos que no pueden ser reciclados, con gestores autorizados por el Ministerio de Salud de Costa Rica. De igual manera, para manejar los residuos peligrosos y bioinfecciosos.  |
| Inclusión de criterios ambientales en las contrataciones de sodas y restaurantes | Se exige a los contratistas asegurar la adecuada separación de los residuos sólidos valorizables y no valorizables generados por los usuarios y en la preparación de los alimentos.  |
| Digitalización de operaciones  | Se implementó el uso de la firma digital y se fomenta el uso de la plataforma "TEC Digital" con el objetivo de compartir información entre los distintos miembros de la comunidad universitaria, sin consumo de papel.   |
| Elaboración de planes de GIR diferenciados                                       | Se crearon los planes de GIR en sectores particulares donde se generan cantidades importantes de residuos especiales, cuyas características impiden reciclarlos o enviarlos al relleno sanitario. Además, se crearon procedimientos para la gestión de los residuos de construcción generados en la remodelación y construcción de nuevos edificios.   |
| Capacitación en la correcta separación de residuos sólidos                       | Durante el primer y segundo semestres se brindan charlas a funcionarios y estudiantes; a estos últimos durante cursos de asistencia obligatoria. En promedio se logra capacitar a 3000 personas por año. Como complemento, se realizan trabajos de voluntariado en el Centro de Acopio de la Institución y actividades para la recolección de residuos en comunidades cercanas   |
| Directriz de eliminación de plásticos de un solo uso                             | Con esta directriz se ha eliminado gran cantidad de residuos como pajillas, bolsas plásticas, botellas plásticas, vasos, platos y tapas. Las sodas, los restaurantes ni los comerciantes tienen autorización para utilizar este tipo de productos dentro de la Institución.  |

## Conclusiones

- El estudio de caracterización realizado en el 2018 indicó una producción per cápita diaria de 0,042 kg de residuos sólidos ordinarios en la Sede Central del ITCR.
- Se comprobó que mediante la aprobación de la directriz Eliminación del Plástico de un Solo Uso en la Institución, acompañada de capacitaciones y campañas relacionadas con ella, se logró disminuir en un 57% los residuos plásticos enviados al relleno sanitario.
- El componente de residuos polilaminados se redujo en un 50% como parte de los resultados del cambio de las etiquetas de los contenedores y las campañas de concientización.
- La generación de residuos sólidos en las residencias estudiantiles disminuyó en un 49% en el 2019, resultado de una producción per cápita de 0,110 kg de residuos diarios.
- En las residencias estudiantiles también se logró reducir en el año 2019 los residuos orgánicos generados en un 74% gracias a la implementación de un programa para la separación de residuos biodegradables y a campañas para la disminución del desperdicio de alimentos.



- El estudio de caracterización realizado permitió identificar malas prácticas en el manejo de residuos sólidos y mejorar los planes de gestión existentes.

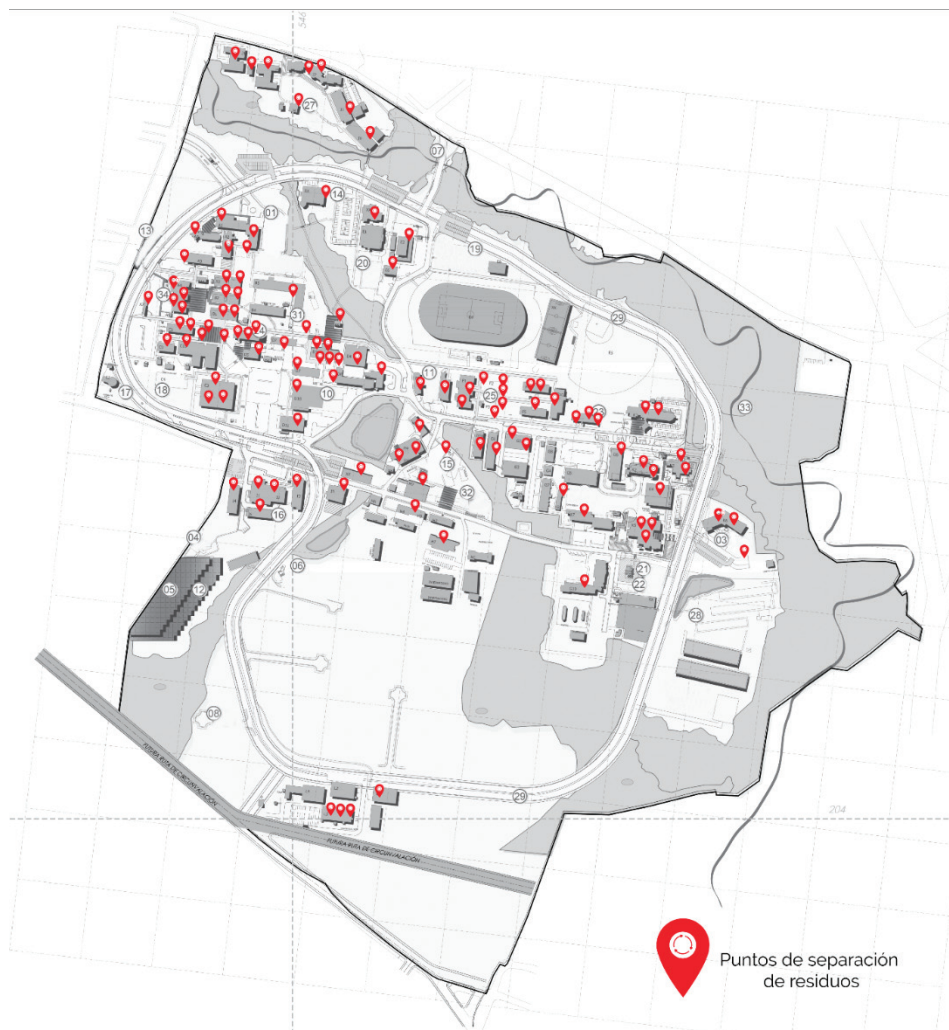
## Referencias

- [1] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, Ley para la Gestión Integral de Residuos. Costa Rica, 2010, pp. 1–8.
- [2] M. Castillo and U. Hardter, Integrated Solid Waste Management in Island Regions. Quito, Ecuador: WWF, 2014.
- [3] H. Tian, J. Gao, J. Hao, L. Lu, C. Zhu, and P. Qiu, “Atmospheric pollution problems and control proposals associated with solid waste management in China : A review,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 252–253, pp. 142–154, 2013.
- [4] B. Gworek, W. Dmuchowski, E. Koda, M. Marecka, A. Sieczka, and P. Osi, “Impact of the municipal solid waste Łubna Landfill on environmental pollution by heavy metals,” *Water*, vol. 8, no. 470, 2016.
- [5] Presidencia de la República y Ministerio de Salud, Reglamento sobre el Manejo de Residuos Sólidos Ordinarios. 2010.
- [6] F. Bermúdez Koumineva, “Coincineración: una posible y controversial alternativa al manejo de los residuos. Caminar de espaldas hacia un laberinto”, *Ambientico*, vol. 261, no. 4, pp. 24–30, 2017.
- [7] A. R. Chacón Araya, G. Jiménez Valverde, J. Montenegro Ballester, J. Sasa Marín y K. Blanco Salas, “Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono”, Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica, 2012.
- [8] H. Asefi and S. Lim, “A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management,” *J. Clean. Prod.*, vol. 166, pp. 1131–114, 2017.
- [9] A. Lagerkvist and L. Dahlén, “Solid waste generation and characterization,” in *Recovery of Materials and Energy from Urban Wastes: A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 2nd ed., N. J. Themelis and A. C. (Thanos) Bourtsalas, Eds. New York, NY: Springer New York, 2019, pp. 7–20.
- [10] M. Essonanawe et al., “Municipal solid waste composition: Sampling methodology , statistical analyses , and case study evaluation,” *Waste Manag.*, 2014.
- [11] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington, DC: World Bank Publications, 2018.
- [12] Ministerio de Salud, Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021, Costa Rica, 2016.
- [13] Ministerio de Salud, Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos 2016-2021, Costa Rica, 2016.
- [14] R. Mejías Elizondo, “Sistema de gestión para la certificación carbono neutralidad en el Instituto Tecnológico de Costa Rica”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2018.
- [15] S. Calderon, “Evaluación de la gestión de residuos sólidos ordinarios en la Sede Central del Tecnológico de Costa Rica”, 2017.
- [16] “Campus Tecnológico Central Cartago”, en Tecnológico de Costa Rica, 2019. [Online]. Available: <https://www.tec.ac.cr/sedes/sede-central-cartago>. [Accessed: 29-Sep-2019].
- [17] Presidencia de la República y Ministerio de Salud, “Metodología para estudios de generación y composición de residuos sólidos ordinarios”. Costa Rica, 2013.
- [18] E. Coyogo, K. Gonzales, E. Heredia y R. Sánchez, “Recomendaciones para la caracterización y cuantificación de residuos sólidos universitarios. Caso de estudio: Universidad Politécnica Salesiana, campus sur, Quito”, *Rev. Ciencias la Vida*, vol. 23, no. 1, pp. 60–71, 2016.
- [19] M. Ruiz Morales, “Caracterización de residuos sólidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México”, *Int. Contam. Ambie*, vol. 28, no. 1, pp. 93–97, 2012.
- [20] J. Rojas-Vargas J. Bogantes, “Cuantificación y caracterización de los residuos sólidos ordinarios de la Universidad Nacional de Costa Rica, dispuestos en rellenos sanitarios”, *UNICIENCIA*, vol. 32, no. 2, pp. 57–69, 2018.
- [21] L. Castillo Meza y M. Luzardo Briceño, “Evaluación del manejo de residuos sólidos en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga”, *Rev. Fac. Ing.*, vol. 22, no. 34, pp. 71–84, 2013.

## Anexos

### Anexo 1. Distribución de centros de transferencia de materiales

en el Campus Central del Tecnológico de Costa Rica



# Tecnología de modulación en el espacio de tiempo- frecuencia ortogonal

## Orthogonal time frequency space modulation technology

Rodrigo Castillo-Rodríguez<sup>1</sup>

---

*Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2019*

*Fecha de aprobación: 18 de marzo de 2020*

Castillo-Rodríguez, R. Tecnología de modulación en el espacio de tiempo-frecuencia ortogonal. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 16-24.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4818>

<sup>1</sup> Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [rodrigo.castillorodriguez@ucr.ac.cr](mailto:rodrigo.castillorodriguez@ucr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0003-0866-7435>



## Palabras clave

Modulación; OTFS; ondas milimétricas; efecto Doppler.

## Resumen

La presente investigación bibliográfica recopila los conceptos básicos de la tecnología de modulación en el Espacio de Tiempo-Frecuencia Ortogonal (OTFS), que será utilizada para la comunicación móvil de quinta generación (5G), la cual presenta ventajas inherentes frente a la modulación de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) utilizada en la comunicación móvil de cuarta generación (4G). Entre ellas podemos destacar su capacidad de transformar un canal que se desvanece aleatoriamente dentro del espacio de tiempo-frecuencia en un canal estacionario, no aleatorio y sin desvanecimiento, entre el transmisor y el receptor. Además, el hecho de que la modulación OTFS opere en dominios en los que el canal puede caracterizarse en una forma muy compacta tiene implicaciones significativas para la solución de los cuellos de botella de estimación de canales, que afectan los sistemas actuales de antenas múltiples, y puede ser una tecnología clave para abordar problemas similares en futuros sistemas masivos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Finalmente, el beneficio clave de la modulación OTFS es su capacidad para operar fácilmente en canales Doppler extremos; esto no solo es útil en las comunicaciones de alta movilidad, sino que también puede ser una tecnología que habilite los sistemas en la banda de frecuencia de onda milimétrica significativamente, para su operatividad en condiciones donde los efectos Doppler se amplifican.

## Keywords

Modulation; OTFS; mmWave; Doppler Effect.

## Abstract

This bibliography research gathers together the basics of the Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation technology, that will be used in the fifth generation (5G) mobile communications; it has inherent advantages in the face of the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulation technique, used in the fourth generation mobile communication (4G). One of these profits is its skill to transform a channel that randomly fades within the time-frequency space into a stationary, deterministic and non-fading channel between the transmitter and the receiver. In addition, there is the fact that OTFS modulation operates in a domain in which the channel can be characterized in a very compact way; this has significant implications for tackling the channel estimation bottlenecks that affect current multi-antenna systems and can be an implementing key technology for addressing similar problems in future massive MIMO systems. Finally, the main benefit of OTFS modulation is its ability to easily operate in extreme Doppler channels; this is not only useful in high mobility communications, but can also be an enabling technology for mmWave systems, where Doppler effects will be significantly amplified.

## Introducción

Actualmente la cantidad de servicios multimedia y dispositivos móviles de alta calidad está aumentando; de ello se deriva la importancia de la transmisión de datos a alta velocidad y de la capacidad del canal de transmisión, por lo que existen varios escenarios para la operación del entorno móvil de alta velocidad [1].

Entre estos escenarios podemos destacar la comunicación móvil 4G, que hace uso de la modulación de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, por sus siglas en inglés). En el marco convencional de un solo portador, la tecnología 4G requiere de un ecualizador de alta complejidad para superar el efecto de la interferencia entre símbolos (ISI, por sus siglas en inglés), lo que demanda un largo tiempo de procesamiento, que hace difícil lograr una comunicación de alta velocidad, por lo que para superar este inconveniente, se ha propuesto la utilización de la modulación OFDM con múltiples señales portadoras para transmitir símbolos de datos. Usando esta técnica, la modulación OFDM cambia el canal selectivo de frecuencia al canal de desvanecimiento plano y usa el prefijo cíclico (CP, por sus siglas en inglés) para superar el ISI [1].

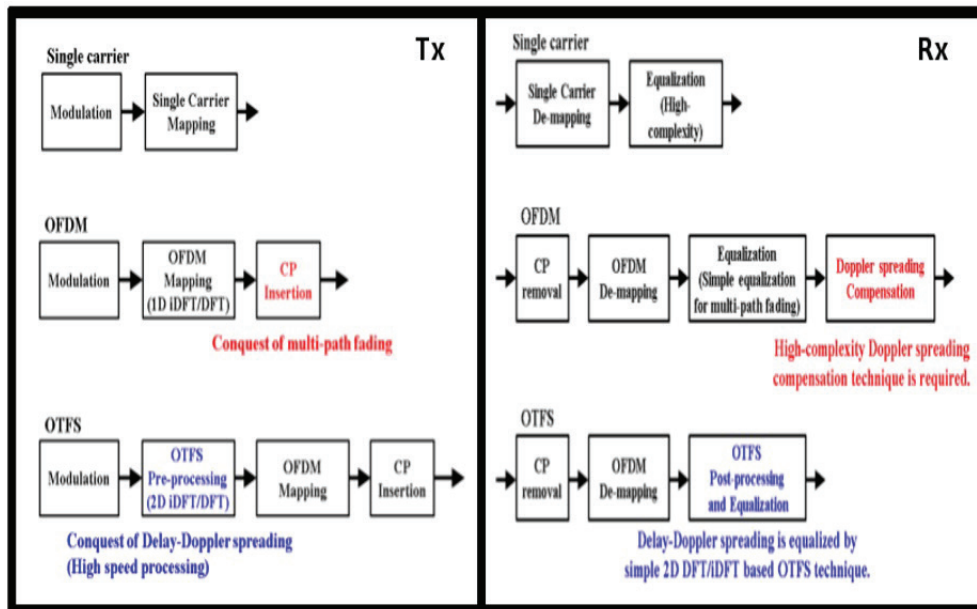
Considerando las numerosas investigaciones en curso sobre el escenario 5G y las comunicaciones móviles de esta tecnología, podemos destacar las referentes a la modulación en el Espacio de Tiempo-Frecuencia Ortogonal (OTFS, por sus siglas en inglés) [1-10]. La modulación OTFS puede compensar el retraso y el efecto de propagación Doppler de alta velocidad mediante el uso de las Transformadas Inversa-Discreta / Discreta de Fourier (IDFT / DFT, por sus siglas en inglés, respectivamente) en dos dimensiones (2D), que convierten la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

La modulación OFDM convencional puede superar efectivamente el efecto ISI mediante el uso del CP. Sin embargo, el sistema requiere un algoritmo de compensación de efecto Doppler de alta complejidad para compensar la señal recibida adicionalmente, o el uso de una modulación de Multiplexación por División de Frecuencia (FDM, por sus siglas en inglés) con una División de Frecuencia en el CP (FD-CP, por sus siglas en inglés), lo que representa una nueva técnica de compensación de los efectos ocasionados por dispersión en los canales Doppler para su operatividad, misma que es denominada como FDM-FD-CP [11].

Especialmente, la comunicación móvil 5G debe ser compatible con los dispositivos móviles en entornos de alta velocidad donde existen retrasos por efecto Doppler, por esta razón el algoritmo de compensación debe tener un efecto Doppler más fuerte que logre contrarrestar este fenómeno, el cual resulta esencial para la eficacia del proceso de comunicación.

La modulación OTFS al ser una extensión 2D de la modulación OFDM (4G) y de la antigua modulación de Código de División de Acceso Múltiple (CDMA, por sus siglas en inglés) (3G), es considerada un sistema OFDM evolucionado que utiliza preprocesamiento y postprocesamiento.

La figura 1 muestra el diagrama de bloques del sistema de comunicación con modulaciones OFDM y OTFS de un solo portador, en donde se pueden observar todos los procesos antes descritos.



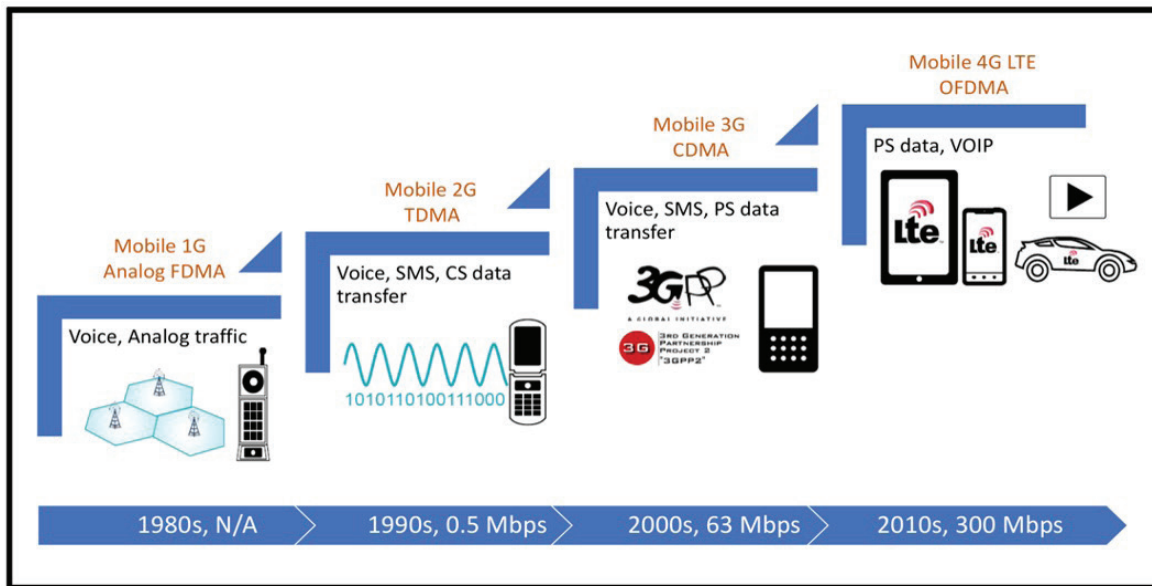
**Figura 1.** Diagrama de bloques del sistema de comunicación con modulaciones OFDM y OTFS de un solo portador. Adaptado de [1].

Por todo lo mencionado anteriormente, este trabajo se centra en los conceptos básicos de la tecnología de modulación OTFS, que según las investigaciones recientes [1-10], es la que mejor responde a las nuevas necesidades de aumento en la velocidad y la capacidad de los canales de transmisión; además de que compensa de forma simple los retrasos Doppler en entornos de alta movilidad [1].

## Desarrollo

La modulación OTFS se utiliza principalmente en las comunicaciones inalámbricas para optimizar su uso. Estas comunicaciones inalámbricas no utilizan un medio físico como el cable o hilos conductores para enviar o recibir información, más bien utilizan la modulación de ondas electromagnéticas en el espacio para lograr la transmisión. Las comunicaciones inalámbricas, como la mayor parte de las tecnologías, han evolucionado a lo largo de los años y han pasado por diferentes etapas (1G - 4G) hasta llegar al paradigma de la tecnología 5G, como se muestra en la figura 2.

Un componente indispensable de los sistemas 5G son las bandas de frecuencia de onda milimétrica, ya que ofrecen un ancho de banda mucho mayor que las bandas celulares clásicas. Sin embargo, un desafío importante es su comportamiento en canales que favorecen una alta dispersión de la onda electromagnética, dado que el ruido de fase y la sensibilidad al movimiento (retardo Doppler) aumentan con la frecuencia de la onda portadora de la información [4], por lo que es decisivo encontrar métodos de modulación cuyo rendimiento no se degrade significativamente en esas circunstancias.



**Figura 2.** Diagrama esquemático de la evolución de las tecnologías de comunicación inalámbricas. Tomado de [12].

El nuevo modelo de modulación OTFS opera en el sistema de coordenadas de retardo Doppler utilizando un conjunto de funciones básicas ortogonales a los cambios de tiempo y frecuencia. Tanto los datos como las señales de referencia o las portadoras son transportados en este sistema de coordenadas. El dominio de retardo Doppler refleja la geometría del canal inalámbrico, que cambia mucho más lentamente que los cambios de fase experimentados en el espacio de tiempo-frecuencia, que varía rápidamente. Los símbolos OTFS experimentan la diversidad completa del canal a lo largo del tiempo y la frecuencia, intercambiando latencia por rendimiento, en escenarios de alta dispersión Doppler [5].

Además, la modulación OTFS difunde la onda base sobre todo el espacio de tiempo-frecuencia en contraste con la modulación OFDM, donde la onda base se encuentra altamente localizada; por consecuencia la modulación OTFS funciona bien particularmente en situaciones con alta dispersión Doppler e información del estado del canal limitada o nula en el transmisor [4].

Una de las características fundamentales de la modulación OTFS es que opera en el dominio de retardo Doppler (esencialmente el dual 2D de Fourier del espacio de tiempo-frecuencia), convirtiendo efectivamente el canal de desvanecimiento variante en el tiempo, que experimenta la modulación OFDM, en un canal sin desvanecimiento e independiente del tiempo [4]. Esto se logra por medio del acoplamiento entre la señal de entrada y el canal, en el espacio tiempo-frecuencia, con la aplicación de una integral doble que relaciona la señal recibida  $r(t)$  y la señal de transmisión  $s(t)$ , como lo expresa la ecuación 1,

$$r(t) = \int \int h(\tau, \nu) e^{j2\pi\nu(t-\tau)} s(t-\tau) d\nu d\tau \quad (\text{ecuación 1})$$

donde  $h(\tau, \nu)$  es la función de expansión del canal, es decir, la transformada de Fourier (con respecto a  $t$ ) de la respuesta al impulso variante en el tiempo  $h(\tau, t)$ . Además  $\tau$  y  $\nu$  son el retraso y el desplazamiento Doppler, respectivamente [4].

En la figura 3 se puede observar el diagrama de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS, donde se utilizan las transformadas simplécticas rápidas de Fourier para codificar (Transformada Inversa Simpléctica Rápida de Fourier, ISFFT por sus siglas en inglés) y decodificar (Transformada Simpléctica Rápida de Fourier, SFFT por sus siglas en inglés) las señales de entrada y salida, respectivamente. Una vez que la señal de entrada es codificada por la ISFFT, pasa por un modulador en que se utiliza una transformación de Heisenberg (ecuación 2), que convierte la señal del espacio de tiempo-frecuencia al dominio del tiempo, para ser acoplada en el canal según la ecuación 1 [2],

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X[n, m] g_{tx}(t - nT) e^{j2\pi m \Delta \nu (t - nT)} \quad (\text{ecuación 2})$$

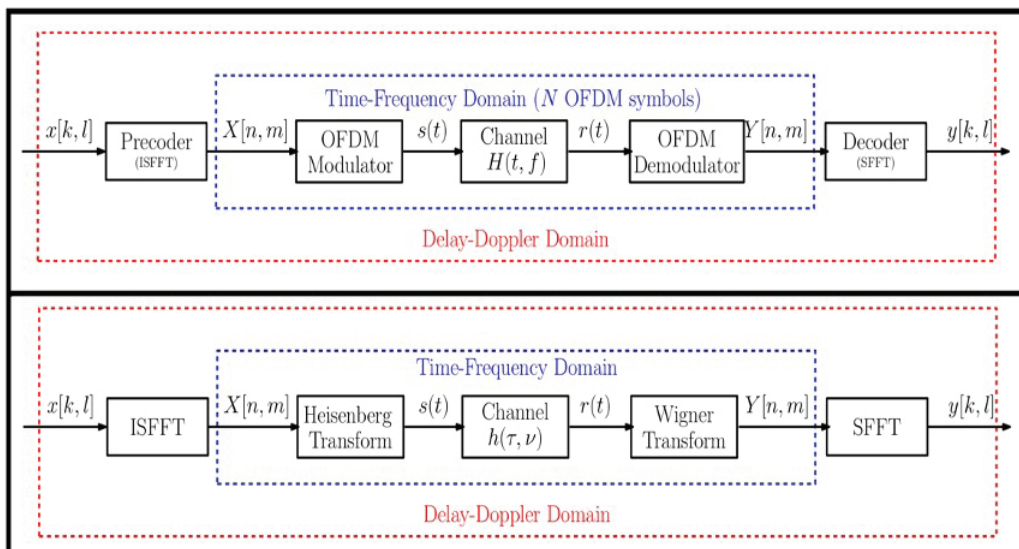
donde  $g_{tx}(t)$  denota el pulso transmitido.

Luego en el receptor esta señal en el dominio del tiempo es devuelta al espacio de tiempo-frecuencia a través de un demodulador en que se utiliza una transformación de Wigner (ecuación 3),

$$\begin{cases} Y(t, \nu) = A_{g_{rx}, r}(t, \nu) = \int g_{rx}^*(t - \tau) r(t) e^{-j2\pi \nu (t - \tau)} dt \\ Y[n, m] = Y(t, \nu) \Big|_{t=nT, \nu=m \Delta \nu} \end{cases} \quad (\text{ecuación 3})$$

donde  $g_{rx}(t)$  es el pulso recibido. Cabe destacar que  $g_{tx}(t)$  y  $g_{rx}(t)$  son ortogonales con respecto a traslaciones en tiempo y frecuencia [2].

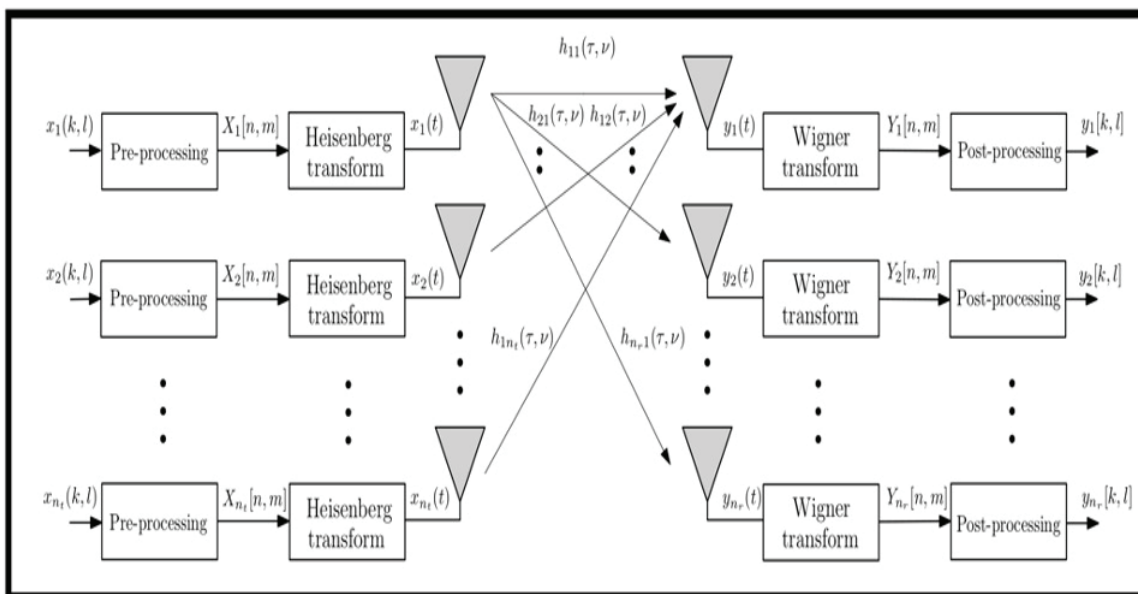
Finalmente esta onda demodulada es decodificada por la SFFT (ver figura 3).



**Figura 3.** Diagrama de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS. Adaptado de [2].

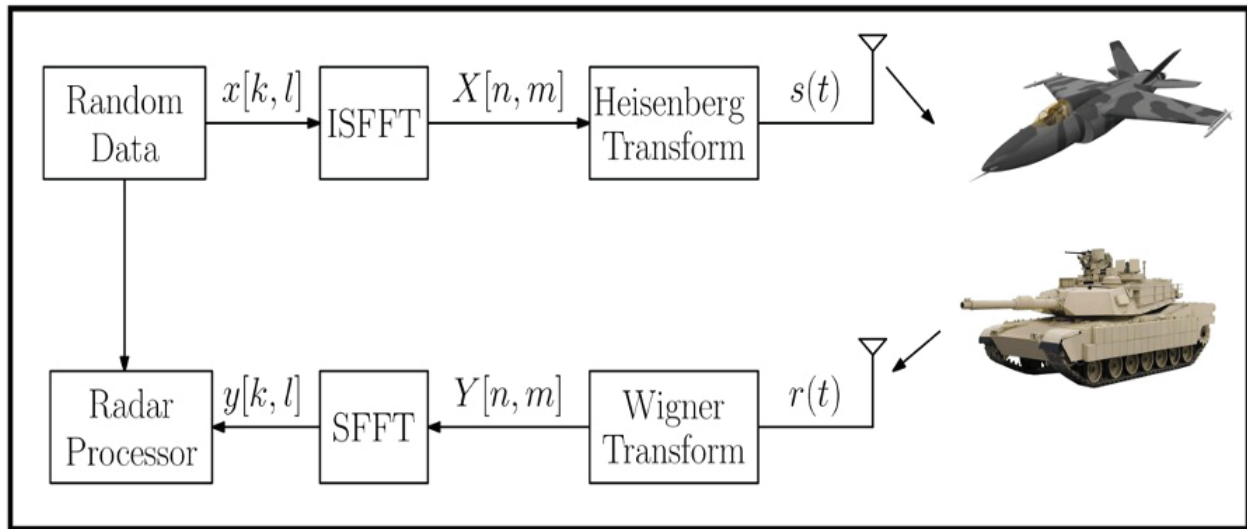


Por otra parte, la modulación OTFS, al compensar de manera concisa el efecto de retardo Doppler, permite transmitir datos a alta velocidad [1, 2]. Esto crea una gran ventaja para los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, por sus siglas en inglés), especialmente para los esquemas de modulación OTFS-MIMO, permitiéndoles transmitir el flujo de datos de cada antena sin degradación del rendimiento de la comunicación, inclusive en los entornos de alta dispersión Doppler [1], gracias a que este esquema (OTFS-MIMO) ofrece los beneficios de alta eficiencia espectral y energética de un sistema MIMO y la robustez de la modulación OTFS en canales de desvanecimiento de alta dispersión Doppler [2]. Esto hace muy atractiva la implementación de este binomio en los futuros sistemas inalámbricos, incluidos los sistemas 5G, donde deben operar en las condiciones de un canal dinámico, tomando en cuenta escenarios de alta movilidad y bandas de frecuencia de onda milimétrica [2]. Un diagrama esquemático de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS para sistemas MIMO se muestra en la figura 4.



**Figura 4.** Diagrama de bloques del sistema de comunicación por modulación OTFS para sistemas MIMO. Tomado de [2].

Cabe destacar que al abordar de manera adecuada los efectos destructivos de la alta dispersión Doppler en las comunicaciones inalámbricas, la tecnología de modulación OTFS tiene un alto potencial de aplicación en otras áreas [7]. Una de ellas es en los sistemas de radar donde se ha demostrado que los algoritmos basados en la modulación OTFS presentan ventajas sobre los algoritmos de radar basados en la modulación OFDM, los cuales proporcionan beneficios adicionales para mejorar las capacidades del radar. Esto se debe a que la modulación OTFS requiere menos CP, por lo tanto, el tiempo de duración de la transmisión es más corto que en la modulación OFDM, lo que proporciona al radar mayor alcance y una velocidad de seguimiento de objetivos más rápida. Además, a diferencia de la modulación OFDM, OTFS está libre de interferencias entre operadores, lo que proporciona una estimación de frecuencia Doppler mayor [7]. La figura 5 muestra el diagrama de bloques de la arquitectura de un sistema de radar basado en la modulación OTFS.



**Figura 5.** Diagrama de bloques de la arquitectura de un sistema de radar basado en la modulación OTFS. Tomado de [7].

## Conclusiones

La modulación OTFS tiene numerosos beneficios que se relacionan con los desafíos que los sistemas con tecnología 5G están tratando de superar. Podría decirse que el mayor beneficio y la razón principal para estudiar esta modulación es su capacidad de transformar un canal que se desvanece aleatoriamente dentro del espacio de tiempo-frecuencia en un canal estacionario, no aleatorio y sin desvanecimiento entre el transmisor y el receptor, por medio de una mejor utilización de los desvanecimientos y las fluctuaciones de potencia en la señal recibida, para maximizar la capacidad [5].

El hecho de que la modulación OTFS opere en un dominio en el que el canal puede caracterizarse en una forma muy compacta tiene implicaciones significativas para resolver los cuellos de botella de estimación de canales que afectan los sistemas actuales de antenas múltiples, y puede ser una tecnología clave para abordar problemas similares en futuros sistemas MIMO masivos [5]. De hecho, ya se ha propuesto un nuevo protocolo de transmisión de Acceso Múltiple No Ortogonal para incorporarlo en la modulación OTFS, denominado OTFS-NOMA por sus siglas en inglés [13].

Otro beneficio clave de la modulación OTFS es su capacidad para manejar fácilmente canales Doppler extremos. Esto no solo es útil en las comunicaciones de alta movilidad de vehículo a vehículo, desde el tren de alta velocidad u otras aplicaciones 5G intensivas en Doppler, sino que también puede ser una tecnología que habilite sistemas de banda de frecuencia de onda milimétrica donde los efectos Doppler se amplifican significativamente [5].

Por último, pero no menos importante, el proceso de estimación de un canal compacto que OTFS proporciona puede ser esencial para el despliegue exitoso de tecnologías avanzadas como la Cooperativa Multipunto (Co-MP, por sus siglas en inglés) y la mitigación de la interferencia distribuida o MIMO de red, que requieren una estimación del canal precisa, para grandes cantidades de puertos de antena en cualquier escenario de movilidad [5].

## Agradecimientos

El autor agradece al profesor Julio Stradi Granados por haberle motivado a realizar esta investigación bibliográfica en el marco del curso EL-5513 Comunicaciones Eléctricas I, de la carrera de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

## Referencias

- [1] C. An & H. G. Ryu, "High throughput mobile communication based on OTFS system with the delay-Doppler compensation". *Wireless Personal Commun.*, 106(2), 473-486, 2019. doi:10.1007/s11277-019-06174-8.
- [2] M. K. Ramachandran & A. Chockalingam, "MIMO-OTFS in high-Doppler fading channels: Signal detection and channel estimation," in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 206-212. IEEE, doi:10.1109/GLOCOM.2018.8647394.
- [3] R. Hadani & A. Monk, *OTFS: A new generation of modulation addressing the challenges of 5G*, 2018. arXiv preprint arXiv:1802.02623.
- [4] R. Hadani, S. Rakib, A. F. Molisch, C. Ibars, A. Monk, M. Tsatsanis,... & R. Calderbank, "Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation for millimeter-wave communications systems," in *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pp. 681-683. IEEE, doi:10.1109/MWSYM.2017.8058662.
- [5] A. Monk, R. Hadani, M. Tsatsanis, & S. Rakib, *OTFS-orthogonal time frequency space*, 2016. arXiv preprint arXiv:1608.02993.
- [6] P. Raviteja, E. Viterbo, & Y. Hong, "OTFS performance on static multipath channels," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 2019. doi:10.1109/LWC.2018.2890643.
- [7] P. Raviteja, K. T. Phan, Y. Hong, & E. Viterbo, *Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation based radar system*, 2019. arXiv preprint arXiv:1901.09300
- [8] P. Raviteja, K. T. Phan, & Y. Hong, "Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-Doppler channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 68(5), 4906-4917, 2019. doi:10.1109/TVT.2019.2906357.
- [9] W. Shen, L. Dai, J. P. An, P. Fan, & R. W. Heath, "Channel estimation for Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Massive MIMO," *IEEE Trans Signal Inf. Process.*, 2019. doi:10.1109/TSP.2019.2919411.
- [10] F. Wiffen, L. Sayer, M. Z. Bocus, A. Doufexi, & A. Nix, "Comparison of OTFS and OFDM in Ray Launched sub-6 GHz and mmWave Line-of-Sight Mobility Channels," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 73-79. IEEE, doi:10.1109/PIMRC.2018.8580850.
- [11] T. Dean, M. Chowdhury, & A. Goldsmith, "A new modulation technique for Doppler compensation in frequency-dispersive channels," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1-7. IEEE, doi:10.1109/PIMRC.2017.8292240.
- [12] A. Chockalingam, H. Hong, & E. Viterbo, E., August 27th, 2018, "Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Modulation" [Tutorial at VTC2018-Fall, Chicago].
- [13] Z. Ding, R. Schober, P. Fan, & H. V. Poor, *OTFS-NOMA: An efficient approach for exploiting heterogenous user mobility profiles*, 2019. arXiv preprint arXiv:1904.02783.

# Anticuerpos monoclonales y el tratamiento del lupus eritematoso sistémico

## Monoclonal antibodies and the treatment of systemic lupus erythematosus

Alex Chavarría-Tapia<sup>1</sup>, Ariana Fernández-Corella<sup>2</sup>,  
Henry Marengo-Acosta<sup>3</sup>, Yorlenny Shen Zhou<sup>4</sup>,  
Malcolm Ugalde-Zumbado<sup>5</sup>, Juan José Mora-Román<sup>6</sup>

*Fecha de recepción: 12 de octubre de 2019*  
*Fecha de aprobación: 13 de febrero de 2020*

Chavarría-Tapia, A; Fernández-Corella, A;  
Marengo-Acosta, H; Shen Zhou, Y;  
Ugalde-Zumbado, M; Mora-Román, JJ. Anticuerpos monoclonales y el tratamiento del lupus eritematoso sistémico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 25-39.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4654>

- 1 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [alex.chavarria@ucr.ac.cr](mailto:alex.chavarria@ucr.ac.cr)
- 2 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [ariana.fernandezcorella@ucr.ac.cr](mailto:ariana.fernandezcorella@ucr.ac.cr)
- 3 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [henry.marengo@ucr.ac.cr](mailto:henry.marengo@ucr.ac.cr)
- 4 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [yorlenny.shenzhou@ucr.ac.cr](mailto:yorlenny.shenzhou@ucr.ac.cr)
- 5 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [malcolm.ugalde@ucr.ac.cr](mailto:malcolm.ugalde@ucr.ac.cr)
- 6 Máster en Bioquímica, Departamento de Farmacia Industrial, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [juanjose.moraroman@ucr.ac.cr](mailto:juanjose.moraroman@ucr.ac.cr)



## Palabras clave

Lupus eritematoso sistémico; cloroquina; hidroxicloroquina; inmunosupresores; glucocorticoides; metotrexato; terapia biológica; anticuerpos monoclonales.

## Resumen

El lupus eritematoso sistémico es una enfermedad autoinmune crónica, que implica la producción de ciertos anticuerpos en todo el cuerpo y la consecuente inflamación de tejidos conjuntivos, así como afecciones cutáneas, hematológicas y cardiovasculares, entre otras. Se ha postulado su procedencia genética, ambiental o inmunológica, incluso de factores hormonales, pero en realidad su etiología es desconocida. El tratamiento convencional se basa en la severidad de sus manifestaciones clínicas. La primera línea de tratamiento es la administración de fármacos antipalúdicos, inmunosupresores, glucocorticoides y metotrexato. Por muchos años, estos han sido de ayuda para los pacientes que sufren esta enfermedad. Lamentablemente, son muy poco selectivos, por lo que causan graves efectos adversos. Ante esta situación, se ha probado el uso de terapias biológicas, las cuales presentan la ventaja de ser más específicas. Una de estas son los anticuerpos monoclonales, como el belimumab, que han disminuido los riesgos de brotes y han mejorado la actividad serológica de los pacientes. Como en el caso del lupus eritematoso sistémico, cada día se está ampliando la investigación enfocada en terapia biológica para el tratamiento de distintas enfermedades autoinmunes.

## Keywords

Systemic lupus erythematosus; chloroquine; hydroxychloroquine; immunosuppressants; glucocorticoids; methotrexate; biological therapy; monoclonal antibodies.

## Abstract

Systemic lupus erythematosus is a chronic autoimmune disease that involves the production of certain antibodies throughout the body and the consequent inflammation of connective tissue, as well as skin, hematological, and cardiovascular conditions, among others. Postulates about its origin vary from a genetic to an environmental, an immunological or a hormonal one, but actually its etiology is unknown. Conventional treatment is based on the severity of its clinical manifestations. The first line of treatment is the administration of antimalarial drugs, immunosuppressants, glucocorticoids, and methotrexate. For many years, all of these medications have given some relief to patients suffering from this disease. Unfortunately, they are not very selective, reason why they cause serious adverse effects to the patients. Given this situation, the use of biological therapies has been sought; these have the advantage of being more specific. One of them are the monoclonal antibodies, such as belimumab, which have reduced the risk of flares and have improved the serological activity of patients. Therefore, research focused on biological therapy for the treatment of different autoimmune diseases such as systemic lupus erythematosus is being expanded every day.

## Introducción

El lupus eritematoso sistémico (LES) es una enfermedad autoinmune crónica que implica la producción de ciertos anticuerpos en todo el cuerpo y la consecuente inflamación de tejidos conjuntivos [1]. Es bastante progresiva, y mortal cuando no se lleva a cabo el tratamiento adecuado [2]. Además, posee una prevalencia por encima de los 150 por cada 100 000 habitantes por año en Estados Unidos [3], y en países de Europa, de entre 28 y 71 por cada

100 000 habitantes por año [4]. En cuanto a la incidencia, se cuenta con un resultado de 5,1 por cada 100 000 habitantes por año en Estados Unidos, y de 2,2 a 4,7 por cada 100 000 habitantes por año en Europa Occidental [4]. Se ha postulado su procedencia genética, ambiental, inmunológica, o incluso por factores hormonales; pero en realidad su etiología es desconocida [5]. Es una enfermedad muy severa en niños y adultos jóvenes, que ofrecía una probabilidad de supervivencia del 50% antes de la introducción de los tratamientos modernos [6].

En países en desarrollo las infecciones relacionadas con esta enfermedad son bastante frecuentes. Por ejemplo, en Ecuador el 47% de los pacientes han desarrollado una infección y en México hasta un 32%, y son estas la principal causa de mortalidad en dichas naciones. Adicionalmente, en determinados países del Extremo Oriente es muy común la enfermedad. En el caso de Costa Rica, se carece de información estadística respecto a esta patología [7].

Los anticuerpos producidos en este trastorno autoinmune tienen la característica de que actúan en contra de componentes nucleares, particularmente anticuerpos contra ADN de doble cadena. Esto conduce a la creación de complejos inmunes circulantes [2]. Dichos complejos se depositan en órganos y producen daño en sus tejidos [8]. Entre los órganos o tejidos afectados se encuentran la piel, las articulaciones, los riñones, los pulmones y el sistema nervioso. Asimismo, se presenta proteinuria persistente con fallo renal crónico asociado a una significativa mortalidad [5].

Para su tratamiento, se emplean medicamentos que conducen hacia la inmunosupresión, por lo que pueden poner la vida del paciente en riesgo, aun cuando permiten el control de la enfermedad [9].

Ante tal situación, ha buscado contar con terapias biológicas, las cuales presentan la ventaja de ser más específicas. Una de estas son los anticuerpos monoclonales, correspondientes al resultado de la fusión en cultivo de un linfocito B y una célula de mieloma. De esta forma, la propiedad de sintetizar anticuerpos del linfocito B y la capacidad de la célula de mieloma de replicarse en un cultivo se conservan [10].

Por ello, el objetivo de la investigación que dio lugar a este artículo fue el conocer acerca del LES, las terapias convencionales y el uso de anticuerpos monoclonales como opción terapéutica contra esta patología.

## Sintomatología

El LES se presenta clínicamente de forma muy variable en los pacientes [1]. Entre los principales síntomas, se encuentran las inflamaciones periódicas [5], las afecciones cutáneas, articulares (artritis, artrosis), hematológicas y cardiovasculares (miocarditis, endocarditis, hipertensión arterial pulmonar), las infecciones, las nefropatías (nefritis, fallo renal), la anemia (trombocitopenia, bicitopenia, pancitopenia), la serositis (derrame pleural, ascitis) y la sepsis (neumonía, herpes e infecciones de vías urinarias) [6].

Una de las complicaciones de mayor seriedad es la nefritis lúpica (LN, por sus siglas en inglés). Existe un 60% de probabilidad de padecerla. Esta se caracteriza por hematuria, proteinuria e hipertensión [11].

La mortalidad y la morbilidad se relacionan con daño severo en los órganos, infecciones a causa de la inmunosupresión y eventos cardiovasculares secundarios [2]. Un estudio por parte del Centro para el Control de Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés) describió un aumento importante en el número anual de muertes, que pasó de 39 a 52 por cada 10 millones de habitantes y totalizó 22 861 muertes en el período entre 1979 y 1998. Por otra parte, el estudio GLADEL (primera cohorte de pacientes latinoamericanos) realizó un seguimiento prospectivo

de 20 años en pacientes con LES y llegó a la conclusión de que la supervivencia a cuatro años era del 95% [12]. Como complemento, se ha observado una disminución en la mortalidad en los últimos cincuenta años, debida a múltiples factores, principalmente por la disposición de nuevos y mejores tratamientos. Sin embargo, la patología provoca una mortalidad de tres a cinco veces mayor que la que sucede en la población en general [7].

## Fisiopatología

El sistema inmune tiene entre sus principales funciones la defensa frente a los microorganismos y la inmunovigilancia contra el desarrollo de tumores, enfermedades autoinmunes y alergias. La inmunidad se clasifica en innata y adquirida. La innata es la primera línea de defensa del huésped y la más rápida. No obstante, ambos tipos funcionan de manera integrada [13].

En cuanto a la fisiopatología del LES, se conoce que el sistema inmune, y específicamente los linfocitos B, no son capaces de diferenciar entre lo propio y lo no propio, por lo que generan reacciones inflamatorias severas en órganos importantes [9]. Estos linfocitos son precursores de autoanticuerpos y de citoquinas proinflamatorias, que regulan la actividad de los linfocitos T [9]. Las citoquinas inducidas por tales anticuerpos corresponden a [14]:

- Interleucina 2 (IL-2): Promueve la proliferación de células T y es producida principalmente por los linfocitos T activados. Forma parte de la respuesta de tipo Th1.
- Factor de necrosis tumoral (TNF, por sus siglas en inglés): Es producida por monocitos, macrófagos y linfocitos. Ejerce un efecto antitumoral a través de un doble mecanismo que incluye la inhibición de la angiogénesis (produce necrosis hemorrágica del tumor) y el aumento de la respuesta inmune antitumoral.
- Interferón alfa (INF- $\alpha$ ): Es producida por un grupo de células inmunes, incluyendo los macrófagos y los linfocitos B. Tiene un potente efecto regulador de las células del sistema inmune, así como también acción antiviral y antineoplásica.

A pesar de que se conoce esta actividad de las citoquinas, aún no se sabe completamente cómo es la participación de las células B en la fisiopatología de esta enfermedad [2].

## Tratamientos convencionales para el LES

El tratamiento se basa en la severidad de sus manifestaciones clínicas. La primera línea de tratamiento es la administración de fármacos antipalúdicos, antiinflamatorios no esteroides (AINES), inmunosupresores y corticosteroides [15].

### Metotrexato

El metotrexato tiene efectos como antiproliferativo, antiinflamatorio e inmunorregulador, que contribuyen a su resultado terapéutico. Su administración a dosis bajas como inmunomodulador en el tratamiento de diversas alteraciones autoinmunitarias ha aumentado recientemente debido a su efectividad, su bajo costo y su esquema terapéutico sencillo (dosis única semanal). Su prescripción en padecimientos por autoinmunidad conlleva el ahorro de esteroides (lo cual es beneficioso, ya que estos son muy empleados y su uso prolongado puede ocasionar efectos adversos bastantes graves) y retrasa la administración de citomoduladores con efectos secundarios graves [16].

Se utilizó por primera vez hace más de cincuenta años para el tratamiento de la psoriasis, una enfermedad inflamatoria crónica de la piel, mediada por células T, que afecta a individuos con predisposición genética y cuenta con varios subtipos clínicos. Se caracteriza por la

presencia de placas eritematosas bien definidas, escamosas y de bordes irregulares. Afecta fundamentalmente las regiones de los codos, las rodillas, el cuero cabelludo y el tronco [17].

Su administración fue aprobada en Estados Unidos por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés) en 1988, para el tratamiento de la artritis reumatoide del adulto. Es un antagonista del ácido fólico (ácido pteroilglutámico). Reduce las concentraciones de tetrahidrofolato (THF) de las células, por inhibición de las enzimas dihidrofolato reductasa (DHFR) y timidilato sintetasa [16]; por ende, inhibe la fase S del ciclo celular, y es justo este mecanismo al que se atribuye la mayor parte de sus efectos no deseados [18]. La dosis es de 7,5 a 10 mg/semana por vía oral [19].

Los efectos adversos ocurren en 30 a 80 % de los pacientes en cualquier estadio terapéutico. Inclusive, llevan a que el 35 % abandone el tratamiento. Esta es una tasa de abandono mayor en comparación a la que se da en ausencia de eficacia. En estudios prospectivos a largo plazo, los efectos gastrointestinales fueron los más frecuentes, entre ellos náusea, vómito, malestar abdominal, hipersensibilidad oral, úlceras orales, disgeusia, anorexia, pérdida de peso, dispepsia y diarrea. Esta situación se debe a que se acumula en el interior de las células de los tejidos gastrointestinales en forma de poliglutamatos [18].

### **Ciclofosfamida y azatioprina**

La ciclofosfamida y la azatioprina son efectivas y ofrecen un potencial de ahorro de esteroides, pero hay preocupación sobre los riesgos de carcinogenicidad y de esterilidad irreversible [20]. La ciclofosfamida presenta serios efectos secundarios como hiperglicemia, pericarditis y tromboflebitis, entre otros [21]. No obstante, el de mayor cuidado es la hepatotoxicidad (se ha reportado en varios estudios), porque el hígado es el sitio primario para la activación microsomal de este fármaco. La causa principal de esta toxicidad son las especies reactivas de oxígeno que se generan durante su metabolismo. Esta acción puede ser potenciada por su metabolito activo, llamado acroleína, el cual puede reaccionar con el glutatión hepático, ocasionando su agotamiento; en adición, aumenta la susceptibilidad de peroxidación lipídica y la lesión de los tejidos hepáticos [22].

Con respecto a la azatioprina, a pesar de su eficacia y su alto uso en el LES, se han documentado efectos adversos tales como supresión de la médula ósea, leucopenia, intolerancia gastrointestinal y hepatotoxicidad. La actividad de la enzima tiopurina metiltransferasa (TPMT) es muy relevante para disminuir la probabilidad de aparición de estos efectos, pues ayuda al cuerpo a eliminar la droga. Esta enzima se ha relacionado con la mielosupresión severa inducida por este fármaco, y si no funciona adecuadamente, puede generar un aumento en el riesgo de sus efectos secundarios [23].

### **Medicamentos antimaláricos**

Se han propuesto varios mecanismos para explicar la acción de la cloroquina y la hidroxicloroquina. Ellos son la supresión de la respuesta de linfocitos T a los mitógenos, la inhibición de la quimiotaxia de los leucocitos, el atrapamiento de los radicales libres, la estabilización de enzimas lisosómicas y la inhibición de la síntesis de ADN y ARN [24].

La hidroxicloroquina es un agente antipalúdico, comúnmente empleado en reumatología. Sus propiedades inmunosupresoras y antiinflamatorias lo hacen un medicamento de primera línea en el tratamiento contra el LES. Es normalmente bien tolerada con dosis de rutina. El efecto no deseado más frecuente es la hiperpigmentación mucocutánea, reportada en un 29 % de los pacientes. Adicionalmente, se han indicado una variedad de efectos adversos en la piel, las uñas y la mucosa [25]. La dosis recomendada no supera los 6,5 mg/kg/día [26].



Por otro lado, la cloroquina ha sido eficaz para controlar la actividad del LES, con efectos secundarios aceptables. Es eficaz para tratar el daño de la piel durante el LES, en la fotoalergia y la artritis leve. Se ha estudiado que el protocolo PMC (metrotrexato y cloroquina juntos para disminuir el uso de corticosteroides) baja los efectos adversos. Su dosis es 250 mg/día [19].

Estos medicamentos antimaláricos fueron inicialmente recomendados para el tratamiento del LES leve a moderado, especialmente de erupciones cutáneas y artritis. En estudios más recientes, mostraron la capacidad de disminuir la actividad de la enfermedad y la posibilidad de trombofilia, y mejorar la supervivencia del paciente. Por ello, están recomendados para el tratamiento del LES activo [27].

Los antimaláricos son la elección habitual para pacientes con una enfermedad que no amenaza los órganos, particularmente para quienes presentan manifestaciones articulares, cutáneas y constitucionales [9]. En una revisión reciente, altos niveles de evidencia permitieron establecer que tanto la hidroxiclороquina como la cloroquina previenen el brote del lupus y aumentan la supervivencia a largo plazo de los pacientes. Además, se encontró evidencia moderada de protección contra el daño irreversible de los órganos, la trombosis y la pérdida de masa ósea [20].

Una revisión de la base de datos del lupus reveló que el 8 % de los pacientes interrumpieron el tratamiento con hidroxiclороquina por ineficacia de este y otro 29 % debido a efectos no deseados como anorexia, náuseas, dolor de cabeza, mareos, trastornos visuales, pérdida auditiva, erupción cutánea y miopatía [9]. No obstante, la toxicidad relacionada con los antimaláricos es poco frecuente, leve y generalmente reversible. Como complemento, la hidroxiclороquina presenta un perfil más seguro en comparación con la cloroquina [20].

### **Medicamentos inmunosupresores**

Los medicamentos inmunosupresores tradicionales para el tratamiento del LES incluyen agentes alquilantes (ciclofosfamida), inosina, inhibidores de la monofosfato deshidrogenasa o IMPDH (micofenolato de mofetilo y ácido micofenólico), inhibidores selectivos de la síntesis de la purina o la pirimidina (azatioprina) e inhibidores de la calcineurina (ciclosporina y tacrolimus). Estos medicamentos no se dirigen a moléculas específicas y suprimen de forma no selectiva diversos procesos celulares. Afectan principalmente los linfocitos, ya que son altamente proliferativos y utilizan vías metabólicas que son el objetivo de los fármacos inmunosupresores [27].

Su uso individual se discute en recomendaciones internacionales. El propósito de combinar diversos fármacos consiste en explotar los distintos mecanismos de acción. Las terapias suelen tener resultados superiores a los esperados por la suma de las drogas individuales, lo que sugiere una sinergia [27].

En un estudio efectuado, se describió la experiencia con la ciclofosfamida en pacientes con LES que presentaban una amplia gama de manifestaciones neuropsiquiátricas [28]. Este es un agente alquilante que previene la separación de las hebras del ADN e inhibe su replicación. El efecto inmunosupresor principalmente es causado por la muerte de las células B. Sus efectos adversos incluyen supresión de la médula ósea, síntomas digestivos, cistitis, disfunción de las gónadas e infecciones [29]. Los resultados sugirieron una eficacia favorable a largo plazo y seguridad del fármaco. Sin embargo, la terapia a altas dosis y a largo plazo se ha asociado con efectos secundarios tales como toxicidad gonadal, complicaciones infecciosas y neoplasias malignas [28].

Otro fármaco empleado es el micofenolato de mofetilo. Se trata de un antirreumático modificador de la enfermedad, semisintético. Se convierte en ácido micofenólico, su forma activa. Inhibe la acción de la inosina monofosfato deshidrogenasa, y de forma secundaria, la proliferación de linfocitos T. Asimismo, interfiere con la lesión leucocítica anterógrada de las células endoteliales

por la inhibición de la E-selectina y la P-selectina, moléculas de adhesión celular que pueden actuar en la respuesta inflamatoria [24].

Entre los efectos no deseados que posee este fármaco se hallan náuseas, dispepsia, dolor abdominal, leucopenia, trombocitopenia y anemia. También es hepatotóxico y aumenta la frecuencia de las infecciones en el organismo [24].

Cabe señalar que este medicamento ha sido de utilidad para el tratamiento de la glomerulopatía colapsante asociada al LES, desarrollada con mayor frecuencia en pacientes de descendencia africana y en mujeres. El micofenolato de mofetilo junto con esteroides y antimaláricos demostró su capacidad para contrarrestar esta glomerulopatía [30].

### Glucocorticoides

Los glucocorticoides han sido un pilar para el tratamiento de pacientes con LES durante sesenta años. Han sido indicados para padecimientos severos como la LN y el LES neuropsiquiátrico. A pesar de esto, la duración y la dosis de tratamiento disponibles en la práctica clínica no se han establecido [27].

Tienen amplios efectos antiinflamatorios en la inmunidad celular, pero pocos sobre la humoral. Se unen a receptores intracelulares y regulan la transcripción de muchos otros genes. Suprimen la formación de citoquinas proinflamatorias tales como la IL-1, que provee un efecto sinérgico sobre la inflamación, y la IL-6, que interviene regulando la respuesta inmune en la hematopoyesis y en las reacciones de fase aguda [11]. En adición, inhiben la activación de los linfocitos T a partir de la síntesis de la IL-2. Además, al tratar los neutrófilos y los monocitos con glucocorticoides, su quimiotaxis se debilita y la liberación de enzimas lisosómicas se reduce [31].

Aunque los glucocorticoides han estado entre los medicamentos más efectivos para tratar el LES, los pacientes han sufrido sus efectos adversos. Dado que la mayoría de las personas con LES tienen síntomas activos de la enfermedad, leves o moderados (50 a 70 %), se debe modificar su dosificación individualmente. Algunos pacientes con síntomas leves pueden no necesitar tratamiento con glucocorticoides.

Abonado a lo anterior, para equilibrar la eficacia y los efectos secundarios, se puede disponer de terapia combinada [19]. Por ejemplo, en pacientes con LES que recibieron tratamiento a base de fluvastatina 20 mg/día por espacio de un mes, se redujeron los niveles de lípidos, el estrés oxidativo y la inflamación vascular. Estos son procesos que participan en la fisiopatología de la aterotrombosis en pacientes con lupus [32]. No obstante, a pesar de las ventajas de emplear glucocorticoides, se trata de limitar su uso. El Grupo de Trabajo Internacional para LES recomienda prescribir las dosis más bajas posibles para el control de la patología y si existe la posibilidad, que se retiren por completo [33].

### Betabloqueadores

Estos medicamentos se prescriben a personas con LES, para taquicardia sinusal y para hipertensión arterial [34]. Los receptores beta adrenérgicos son glucoproteínas de membrana halladas en varios tejidos. Desempeñan una función decisiva en la fisiología cardiovascular, al modular la actividad cardíaca y el tono vascular. El receptor beta se acopla a la proteína  $G_s$  estimulante. Esta a su vez inicia una cascada de respuestas que culmina en la entrada de calcio a la célula para participar en la contracción mecánica por medio del complejo de actina y miosina. Los betabloqueadores modulan la actividad de los miocitos y la contracción del músculo liso vascular, al disminuir la entrada de calcio a la célula [35].

Los parámetros de la prueba de ejercicio realizada por pacientes tratados con estos medicamentos indicaron resultados significativamente peores en comparación a aquellos sin este tratamiento, lo que sugiere su influencia en su pobre función física. La fatiga y el mal estado físico fueron reportados como efectos secundarios comunes en el tratamiento con tales sustancias y deberían ser tomados en consideración durante la selección de los medicamentos cardiovasculares. Se puede suponer que los bloqueadores de canales de calcio no dihidropiridina (verapamil/diltiazem) o la ivabradina podrían ser más seguros y beneficiosos en comparación con los betabloqueadores para el tratamiento de la taquicardia en este trastorno [34].

En general, se puede apreciar que el tratamiento convencional puede acarrear muchos efectos adversos y traer más perjuicios que beneficios a los pacientes. Por esta razón, se han investigado otras alternativas como son los medicamentos biológicos. Estos ofrecen ventaja de poder establecer la terapia con mayor especificidad. Un ejemplo de ellos son los anticuerpos monoclonales.

### **Anticuerpos monoclonales**

Corresponden a proteínas de globulina o inmunoglobulinas (Ig), las cuales reaccionan específicamente contra el antígeno que estimuló su producción. Son de suma importancia en el sistema inmune, debido a que actúan de varias maneras para proteger al organismo frente a diversos agentes invasores y forman parte del 20 % de las proteínas en el plasma sanguíneo. La sangre posee tres tipos de globulinas (alfa, beta y gamma), nombradas en función de su tasa de migración electroforética. Los anticuerpos son gammaglobulinas y existen cinco clases: IgG, IgM, IgA, IgD e IgE [36].

Estas inmunoglobulinas son sintetizadas en los linfocitos B. Su estructura consiste en cadenas polipeptídicas en forma de Y, con dos cadenas ligeras iguales y dos cadenas pesadas idénticas. El término pesada o ligera hace referencia a su peso molecular. Las ligeras poseen un peso molecular alrededor de 25 000 Da, mientras que las pesadas entre 50 000 y 70 000 Da. Estas cadenas se hallan unidas mediante enlaces disulfuro [36].

Estructuralmente, cada cadena polipeptídica posee una región variable y una constante. La constante es similar entre las inmunoglobulinas. Determina la función y el destino del anticuerpo, es decir, su clase [37].

Por otra parte, la secuencia de aminoácidos de la región variable difiere para cada inmunoglobulina específica. Las diferencias que poseen en su estructura secundaria determinan el sitio de unión de un antígeno distintivo y a esto se atribuye la especificidad del anticuerpo a esta región [37].

Consecuentemente con el estudio efectuado en torno a estos componentes del sistema inmune, se han desarrollado los anticuerpos monoclonales. Estos se comportan de la misma forma que lo harían aquellos producidos por células plasmáticas. Reconocen los antígenos que estimularon su producción, se unen a ellos y los marcan para facilitar su eliminación por parte de las células del sistema inmune [38].

En cuanto a la técnica de su producción, fue desarrollada por César Milstein y George Köhler en el Laboratorio de Biología Molecular del Medical Research Council, en Cambridge, Reino Unido. Este procedimiento permitió generar un anticuerpo específico frente a una diana seleccionada a partir de un único clon inmortal de células productoras de anticuerpos. La característica principal y más importante es su especificidad frente a un antígeno concreto. Como complemento, es posible obtenerlos en grandes cantidades, lo cual posibilita utilizarlos en órganos efectores específicos. Desde la publicación de esta técnica en 1975, se ha dado el

desarrollo y la obtención de diversos anticuerpos monoclonales para su aplicación en diferentes campos científicos, entre ellos el diagnóstico, el investigativo y el terapéutico [39].

### Producción de anticuerpos monoclonales

Su generación inicialmente se logró por medio de animales como ratones o ratas. Se basa en la fusión de una célula de mieloma con una célula productora del anticuerpo de interés (linfocito B). Posteriormente, se eliminan las células no híbridas, obteniendo el cultivo para un antígeno determinado. Este anticuerpo debe ser sometido a una prueba de reactividad de la línea celular híbrida. Luego, se permite su propagación en el medio de cultivo. Cuando el cultivo se desarrolla lo suficiente, se toma una sola célula del hibridoma, y se clona una y otra vez hasta obtener una línea celular capaz de producir el mismo anticuerpo. Como resultados de este método de producción, es posible conseguir grandes cantidades de suero y las células del hibridoma pueden ser almacenadas en nitrógeno para su posterior empleo [39]. No obstante, debido al desarrollo de reacciones de hipersensibilidad ante los anticuerpos de origen murino, se desarrollaron técnicas para humanizarlos.

### Humanización de anticuerpos

La técnica de humanización se estableció para disminuir los componentes del anticuerpo de ratón. Para este proceso, se transfieren las regiones determinantes de complementariedad (CDR, por sus siglas en inglés) de la región hipervariable, provenientes de las Ig de ratón, a estructuras de las regiones variables o constantes de cadenas pesadas o ligeras de una Ig humana. Estas CDR poseen la capacidad de interactuar directamente con el epítipo del antígeno. Sin embargo, se ha demostrado que dicha transferencia puede generar una afinidad variable hacia el antígeno [40].

La construcción de estos anticuerpos mediante la tecnología de bibliotecas de fagos con genes que codifican las regiones variables de Ig es otra estrategia. Consiste en generar genotecas de genes responsables de las regiones variables de las cadenas pesadas y ligeras del anticuerpo, por medio de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés). Después, se utilizan enzimas de restricción y se obtienen secuencias génicas que codifican para las fracciones variables de las cadenas simples. Para finalizar, se introducen las secuencias en el genoma del fago, que a su vez las transfiere a células productoras de anticuerpos [41].

Otra técnica consiste en la obtención mediante ratones transgénicos. Estos fueron transfectados con los genes que codifican para los anticuerpos en seres humanos. Por ende, al estar en contacto con un antígeno, solo van a ser capaces de producir anticuerpos completamente humanos [42].

Tomando en cuenta este proceso de humanización, los anticuerpos monoclonales pueden clasificarse en quiméricos, humanizados y humanos. Para constatar su origen, reciben distintos nombres, en el que cada terminación tiene un significado. De esta manera, el sufijo va a variar dependiendo de la naturaleza del anticuerpo monoclonal [43]:

- Omab: anticuerpos murinos
- Ximab: anticuerpos quiméricos
- Zumab: anticuerpos humanizados
- Umab: anticuerpos humanos

## Anticuerpos monoclonales aprobados actualmente contra el LES

### Belimumab (Benlysta®)

Es un anticuerpo monoclonal aprobado en marzo de 2011 por la FDA para el tratamiento del LES en adultos [44]. En adición, esta misma entidad autorizó su empleo en niños en abril de 2019 [45]. Este fármaco es una IgG1 monoclonal humana que se une al estimulador de linfocitos B (BLyS, por sus siglas en inglés). También es conocido como factor activador de células B (BAFF, por sus siglas en inglés). Esta unión evita que el BAFF actúe sobre las células B [44] [46]. El BLyS es una citoquina de la familia del TNF, importante para la diferenciación y la supervivencia de los linfocitos B. En esta patología, este factor está sobreexpresado, por lo que promueve la supervivencia de dichos linfocitos, incluidos los autorreactivos. Asimismo, la alta concentración de BLyS en la circulación se correlaciona con una mayor actividad de la enfermedad y una elevada concentración de anticuerpos contra ADN de doble cadena [47].

Los ensayos clínicos BLISS-52 y BLISS-76 demostraron la eficacia de este medicamento para reducir la actividad de la enfermedad y para prevenir brotes, especialmente en sus manifestaciones mucocutáneas y musculoesqueléticas, así como en un subconjunto de pacientes con autoanticuerpos positivos que tenían una concentración baja de la proteína del sistema de complemento C3. Sin embargo, no se ha establecido si es efectivo en la LN y en las manifestaciones del sistema nervioso central [44].

El objetivo del ensayo clínico BLISS-52 era evaluar la eficacia y la seguridad del belimumab y la tolerabilidad a este en pacientes con LES. Fue un estudio de fase III con pacientes de América del Sur, Asia y Europa del Este. Se logró demostrar la reducción en el riesgo de brotes, la consecuente disminución del daño a largo plazo, y con ello el descenso de la morbilidad y la mortalidad, y una mejor calidad de vida. Además, se apreció el progreso de la actividad serológica, porque hubo una reducción significativa de las concentraciones de anticuerpos contra ADN de doble cadena. De igual forma, la hipergammaglobulinemia y las concentraciones de complemento aumentaron. Adicionalmente, con este anticuerpo monoclonal, se redujeron con el tiempo las dosis de corticosteroides, evitando así los efectos no deseados y los daños a largo plazo, y disminuyendo el riesgo de infección [48].

En cuanto al BLISS-76, fue el segundo ensayo clínico de fase III del belimumab para tratar el LES. Este fue efectuado con pacientes de América del Norte y Europa. Al igual que con el BLISS-52, se observó una disminución en los títulos de anticuerpos contra ADN de doble cadena y un aumento en las concentraciones de C3 y C4, otra proteína del sistema de complemento. También se observó una disminución de células B activadas y vírgenes, pero no de linfocitos T, ni de células B de memoria. Este estudio evidenció la durabilidad del efecto del fármaco hasta por 76 semanas [49].

Por otro lado, en un tercer estudio se encontró que pacientes con LES presentaban una gran fracción de linfocitos B de memoria y una diferenciación celular muy marcada. Una vez aplicado el tratamiento con el anticuerpo monoclonal, hubo una disminución rápida de células B de las etapas iniciales de desarrollo, mientras que las de etapas posteriores fueron más resistentes a alteraciones. Esto indicó que las modificaciones en dichas células ocurren en dos fases, una temprana rápida y una tardía lenta. Asimismo, hubo una disminución rápida de los niveles de anticuerpos contra ADN de doble cadena, con el inicio del tratamiento, y de la actividad del LES continuo [50].

El Instituto Nacional de Salud y Excelencia Clínica (NICE, por sus siglas en inglés) creó una guía para este fármaco como tratamiento complementario para el LES, junto con autoanticuerpos positivos, en adultos [51].

En cuanto a Costa Rica, este producto se comercializa en el país desde el 2015. Su forma farmacéutica es de polvo concentrado para infusión, de 120 y de 400 mg [52].

## Perspectivas a futuro

### Anticuerpos monoclonales en estudio y pruebas para el tratamiento del LES

Ofatumumab es un anticuerpo monoclonal contra el CD20 (cúmulo de diferenciación 20). Este es un marcador expresado en los linfocitos B, permitiendo que los antiCD20 puedan realizar una acción dirigida hacia dichas células y provocar opsonización, lisis y muerte [53]. Se encuentra con permiso para la venta en el Reino Unido, para tratar la leucemia linfocítica crónica (LLC). Asimismo, ha mostrado en distintos estudios de casos ser efectivo contra el LES [44], como sucedió en dos pacientes juveniles [54]. Además, es una opción prominente para tratar casos en que no se tolere el rituximab o no produzca buen resultado (causa agotamiento por la disminución de linfocitos B reguladores, debilitando la respuesta autoinmune [55]). En una investigación, se utilizó ofatumumab, acompañado de plasma fresco congelado, en pacientes con LES juvenil que no presentaban buenas respuestas al rituximab, y se obtuvo una respuesta de inhibición de células B autorreactivas ligeramente mayor con respecto a este otro anticuerpo monoclonal [56].

Por otra parte, sifalizumab y anifrolumab son agentes bloqueadores del INF- $\alpha$ . Ambos han dado resultados prometedores en pruebas preliminares, especialmente en casos de INF- $\alpha$  altamente expresado [44].

Otro anticuerpo monoclonal en estudio es el ustekinumab. Este bloquea la IL-12 y la IL-23. Ambas tienen un papel importante en la respuesta inflamatoria; igualmente, desempeñan un rol en las respuestas autoinmunes. Al bloquearlas, tanto la respuesta inmune como la inflamatoria en los tejidos disminuyen [57]. Actualmente, se encuentra aprobado para psoriasis y para artritis reumatoide. En un estudio de fase II realizado a pacientes con LES, se obtuvo una gran mejoría con respecto a la actividad de la enfermedad al cabo de 24 semanas. En adición, mostró que reducía los niveles de anticuerpos contra ADN de doble cadena [58].

Epratuzumab es otro fármaco prometedor. Se trata de un anticuerpo monoclonal humanizado que se ancla a los CD22 (marcadores presentes en la membrana de las células B, los cuales sirven como un interruptor molecular que puede sesgar la señalización de inmunoglobulinas de membrana a sitios anatómicos ricos en células T [59]) e impide que estas activen sus mecanismos de señalización. Dos estudios clínicos han demostrado que se puede mejorar la calidad de vida de los pacientes y reducir el uso de esteroides con su empleo [60].

El eculizumab también se halla en estudio. Es un anticuerpo monoclonal IgG2/IgG4 humanizado, que actúa inhibiendo el C5, un componente importante en el sistema del complemento. Se halla actualmente en estudios de fase I [44].

Muchas otras opciones y nuevos medicamentos se encuentran en diferentes fases de estudios clínicos. Estos no están aprobados para LES, aunque podrían serlo en un futuro cercano.

### Otras terapias biológicas en estudio para el tratamiento del LES

Ataccept es una proteína de fusión TACI-IgG (proteínas creadas por medio de ingeniería genética, al implantar genes en organismos que funcionan como biorreactores para producir y posteriormente, aislar y purificar dichas proteínas para su uso contra diversas patologías [61]), que bloquea los factores activantes de células B, BLys y APRIL. En estudios de fase II, ha mostrado resultados bastante prometedores en la prevención de crisis y en la reducción

de la actividad patológica, sin presentar efectos no deseados serios [44]. Como corolario, en un estudio de fase II realizado en 306 pacientes, se logró una mejoría significativa al reducir el avance y la actividad de la enfermedad [58].

Por otro lado, en un estudio preclínico conducido en ratones, utilizando terapia génica con  $\alpha 1$ -antitripsina humana (inhibidor de proteasas más abundante en el suero humano [62]), se demostró que esta es capaz de impedir la activación de las células dendríticas y su función, incluyendo la producción de IL-12. Igualmente, este tratamiento demostró mejorar la condición de los ratones y extender su tiempo de vida [63]. Actualmente, se están llevando a cabo más estudios en fase preclínica.

Adicionalmente, se ha encontrado que dosis bajas de IL-2 sirven para regular la acción de los linfocitos T citotóxicos y tratar el LES. En estudios clínicos, se determinó que su mecanismo endógeno inhibe la respuesta exacerbada del sistema inmune y reduce el ataque de autoanticuerpos a los tejidos del paciente. Este descubrimiento puede servir para encontrar nuevas alternativas para el tratamiento de esta y otras enfermedades autoinmunes [60].

Finalmente, se halla el trasplante de células alogénicas del estroma mesenquimatoso. Estas generaron la disminución de la proteinuria en pacientes con nefritis producida por LES. Lo anterior se dio en tan solo un mes, con una completa remisión dos o tres meses después. También mejoraron su filtración glomerular y sus niveles de creatinina [64], por lo cual puede ser una buena posibilidad a futuro para tratar la nefritis por LES.

## Conclusiones

El lupus eritematoso sistémico es una enfermedad autoinmune crónica que produce anticuerpos en todo el cuerpo y causa una inflamación en tejidos conjuntivos. Entre sus principales síntomas se encuentran, junto con la inflamación, las afecciones cutáneas, las articulares y las hematológicas.

Las alternativas de terapia convencional disponibles son bastantes y se han utilizado por muchos años, lo que demuestra su efectividad. El problema relacionado con estas prácticas ha sido su poca selectividad, ocasionando a los pacientes distintos efectos adversos que pueden llegar a ser muy graves.

Por ello, se han estudiado los anticuerpos monoclonales, y ha sido demostrado que son una terapia biológica efectiva contra el LES. Esto se evidencia con el uso del belimumab como terapia complementaria al tratamiento convencional. Su administración ha disminuido el daño a largo plazo en los pacientes, mejorando su calidad de vida. Por lo tanto, cada día se está ampliando la investigación enfocada en terapia biológica, para el tratamiento de diversas enfermedades autoinmunes como el LES. Dicha situación supone un panorama muy favorable de las opciones terapéuticas futuras para pacientes que sufren esta enfermedad.

## Referencias

- [1] M. S. Mohd Shahrir, A. G. Abdul Halim, Z. Soehardy, and C. T. Norella Kong, "Clinical experience in using CD20 monoclonal antibody in treating severe systemic lupus erythematosus," *APLAR Journal of Rheumatology*, 10, 112-116, 2007.
- [2] R. I. L. Machado, M. A. Scheinberg, M. Y. C. F. Queiroz, D. C. S. E. Brito, M. F. B. R. Guimarães, R. A. Giovelli *et al.*, "Use of rituximab as a treatment for systemic lupus erythematosus: Retrospective review," *Einstein*, 12(1), 36-41, 2014.
- [3] H. M. A. Ahmed, S. Abohamad, M. Elfishawi, M. T. Hegazy, and K. Vijaykumar, "Subcutaneous formulation of belimumab in treatment of systemic lupus erythematosus: A critical review with focus on safety and satisfaction," *Patient Preference and Adherence*, 12, 2475-2479, 2018.

- [4] J. A. Gómez-Puerta y R. Cervera, "Lupus eritematoso sistémico," *Medicina & Laboratorio*, 14(5-6), 211-223, 2008.
- [5] M. L. Specchia, C. de Waure, M. R. Gualano, A. Doria, G. Turchetti, L. Pippo *et al.*, "Health technology assessment of belimumab: A new monoclonal antibody for the treatment of systemic lupus erythematosus," *BioMed Research International*, 2014, 704207, 2014.
- [6] R. Sakthiswary and E. Suresh, "Methotrexate in systemic lupus erythematosus: a systematic review of its efficacy," *Lupus*, 23(3), 225-235, 2014.
- [7] M. A. Villalobos Zúñiga, "Enfermedades infecciosas en pacientes con lupus eritematoso sistémico en el Hospital Calderón Guardia: caracterización, incidencia, profilaxis y factores asociados," *Revista Clínica de la Escuela de Medicina UCR – HSJD*, 2(6), 21-34, 2012.
- [8] F. Schaper, M. M. van Timmeren, A. Petersen, G. Horst, M. Bijl, P. C. Limburg *et al.*, "Treatment with anti-HMGB1 monoclonal antibody does not affect lupus nephritis in MRL/lpr mice," *Molecular Medicine*, 22, 12-21, 2016.
- [9] J. S. Hui-Yuen, S. C. Nguyen, and A. D. Askanase, "Targeted B cell therapies in the treatment of adult and pediatric systemic lupus erythematosus," *Lupus*, 25(10), 1086-1096, 2016.
- [10] J. F. Flores-Ramírez, H. García-Bernal, E. U. Morales-León y C. U. Islas-Martínez, "Usos de anticuerpos monoclonales en medicina," *TEXEPI, Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 11, 25-28, 2019.
- [11] L. Zurita-Gavilanes and A. Costa-Valarezo, "Rituximab in lupus nephritis: A non-systematic review," *Reumatología Clínica*, 12(4), 210-215, 2016.
- [12] M. Enberg, M. Kahn, C. Goity, M. V. Villalón, J. Zamorano, F. Figueroa, "Infecciones en pacientes con lupus eritematoso sistémico," *Revista Médica de Chile*, 137(10), 1367-1374, 2009.
- [13] P. Toche, "Visión panorámica del sistema inmune," *Revista Médica Clínica Las Condes*, 23(4), 446-457, 2012.
- [14] X. Filella, R. Molina, A. M. Ballesta, "Estructura y función de las citocinas," *Medicina Integral*, 39(2), 63-71, 2002.
- [15] D. M. Barahona-López, L. E. Sánchez-Sierra, C. F. Matute-Martínez, I. A. Barahona-López, R. Perdomo-Vaquero, G. Erazo-Trimarchi, "Hospitalización en lupus eritematoso sistémico: causas, actividad lúpica y evolución," *Medicina Interna de México*, 33(6), 730-738, 2017.
- [16] L. Esquivel-Pedraza, L. Fernández-Cuevas, Y. M. Sánchez-Jiménez, J. Domínguez-Cherit y S. Méndez-Flores, "Lesiones de la mucosa bucal por administración de metotrexato en pacientes con artritis reumatoide," *Dermatología, Revista Mexicana*, 61(6), 492-499, 2017.
- [17] M. E. Alfonso-Valdés, "Inmunopatogenia de la psoriasis: impacto en las manifestaciones clínicas y el tratamiento de la enfermedad," *Revista Cubana Hematología, Inmunología y Hemoterapia*, 28(4), 357-373, 2012.
- [18] A. A. Hernández-Collazo, A. C. Rodríguez-Mena, M. R. Ferrusco-Ontiveros, E. D. Poletti-Vázquez, "Estomatitis por metotrexato y sus efectos orales a bajas dosis," *Dermatología, Revista Mexicana*, 58, 458-464, 2014.
- [19] T. Li, S. L. Chen, D. E. Furst, C. D. Bao, L. Li, and S. Chen, "A 1-year study of two doses of steroid in combination with methotrexate and chloroquine in the treatment of patients with mild and moderate systemic lupus erythematosus," *APLAR Journal of Rheumatology*, 9, 392-396, 2006.
- [20] M. N. Islam, M. Hossain, S. A. Haq, M. N. Alam, P. M. Ten Klooster, and J. J. Rasker, "Efficacy and safety of methotrexate in articular and cutaneous manifestations of systemic lupus erythematosus," *International Journal of Rheumatic Diseases*, 15(1), 62-68, 2012.
- [21] B. Brochet, M. S. A. Deloire, P. Perez, T. Looock, L. Baschet, M. Debouverie *et al.*, "Double-blind controlled randomized trial of cyclophosphamide versus methylprednisolone in secondary progressive multiple sclerosis," *PLoS ONE*, 12(1), e0168834, 2017.
- [22] D. R. G. El-Karim and G. El-Amrawi, "Cyclophosphamide hepatotoxicity: The role of 4-hydroxynonenal and cytochrome C oxidase and the possible protective effect of *Ganoderma lucidum* extract," *Slovenian Veterinary Research*, 56(Suppl 22), 15-23, 2019.
- [23] D. Chen, F. Lian, S. Yuan, Y. Wang, Z. Zhan, Y. Ye *et al.*, "Association of thiopurine methyltransferase status with azathioprine side effects in Chinese patients with systemic lupus erythematosus," *Clinical Rheumatology*, 33(4), 499-503, 2014.
- [24] N. H. Borazan y D. E. Furst, "Fármacos antiinflamatorios no esteroideos, antirreumáticos modificadores de la enfermedad, analgésicos no opioides y fármacos usados en la gota," en *Farmacología Básica y Clínica*, 13.a ed., B. G. Katzung y A. J. Trevor, Eds. México DF: Mc Graw-Hill Interamericana Editores, 2016.
- [25] S. Zhang, X. Liu, L. Cai, J. Zhang, and C. Zhou, "Longitudinal melanonychia and subungual hemorrhage in a patient with systemic lupus erythematosus treated with hydroxychloroquine," *Lupus*, 28(1), 129-132, 2019.



- [26] A. Danza, D. Graña, M. Goñi, A. Vargas y G. Ruiz-Irastorza, "Hidroxiclороquina en el tratamiento de las enfermedades autoinmunes sistémicas," *Revista Médica de Chile*, 144(2), 232-240, 2016.
- [27] M. Gatto, M. Zen, L. Iaccarino, and A. Doria, "New therapeutic strategies in systemic lupus erythematosus management," *Nature Reviews Rheumatology*, 15(1), 30-48, 2019.
- [28] A. Fanouriakis, C. Pamfil, P. Sidiropoulos, L. Damian, A. Flestea, G. Gusetu *et al.*, "Cyclophosphamide in combination with glucocorticoids for severe neuropsychiatric systemic lupus erythematosus: A retrospective, observational two-centre study," *Lupus*, 25(6), 627-636, 2016.
- [29] T. Igarashi, T. Igarashi, A. Shimizu, and Y. Itoh, "Intravenous Cyclophosphamide Pulse Therapy in Japanese Children with Systemic Lupus Erythematosus," *Journal of Nippon Medical School*, 80(5), 396-400, 2013.
- [30] A. Chico Capote, M. Estévez del Toro, J. F. Gálvez Vallejo, D. Chía Proenza y A. Chong López, "Glomerulopatía colapsante en lupus eritematoso sistémico con respuesta positiva a tratamiento con mofetil micofenolato," *Revista Cubana de Medicina*, 57(2), 1-6, 2018.
- [31] A. M. Krensky, J. R. Azzi, and D. A. Hafler, "Immunosuppressants and Tolerogens," en *Goodman & Gilman's. The Pharmacological Basis of Therapeutics*, 13th ed., L. L. Brunton, R. Hilal-Dandan, and B. C. Knollmann, Eds. Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 2018.
- [32] O. L. Vera-Lastra, A. Olvera-Acevedo, C. Hernández, G. Medina, A. N. Carillo-González, U. Ángeles-Garay *et al.*, "Efecto de pravastatina más ezetimibe en el grosor intimamedia carotídea en pacientes con lupus eritematoso," *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 53(Supl. 1), S74-S79, 2015.
- [33] S. Kabadi, J. Yeaw, A. K. Bacani, E. Tafesse, K. Bos, S. Karkare *et al.*, "Healthcare resource utilization and costs associated with long-term corticosteroid exposure in patients with systemic lupus erythematosus," *Lupus*, 27(11), 1799-1809, 2018.
- [34] J. L. Englund and W. P. Kerns II, "Beta Bloqueadores," *Medicina de Urgencias*, 8.ª ed., J. E. Tintinalli, J. S. Stapczynski, O. J. Ma, D. M. Yealy, G. D. Meckler, and D. M. Cline, Eds. Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 2018.
- [35] P. Bienias, M. Ciurzyński, A. Chrzanowska, I. Dudzik-Niewiadomska, K. Irzyk, K. Oleszek *et al.*, "Attenuated post-exercise heart rate recovery in patients with systemic lupus erythematosus: the role of disease severity and beta-blocker treatment," *Lupus*, 27(2), 217-224, 2018.
- [36] "Antibodies," *Review of Medical Microbiology and Immunology*, 14th ed., W. Levinson, Review of Medical Microbiology and Immunology, 14th ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2016.
- [37] D. Sadava, G. Heller, G. Orians, W. Purves, and D. Hillis, *Vida: La Ciencia de la Biología*, 8.ª ed. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana, 2009.
- [38] "Base celular de la respuesta inmunitaria," *Biología celular y molecular*, 4.ª ed., R. Paniagua, M. Nistal, P. Sesma, M. Álvarez-Uría, B. Fraile, R. Anadón *et al.*, *Biología Celular y Molecular*, 4.ª ed. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2017.
- [39] S. Magadán y A. González-Fernández, "Generación de anticuerpos monoclonales *in vivo*," *Anticuerpos Monoclonales: Realidades y Perspectivas*, L. Álvarez Vallina, Ed. Madrid: Editorial Complutense, S.A, 2004.
- [40] N. P. Machado, G. A. Téllez y J. C. Castaño, "Anticuerpos monoclonales: desarrollo físico y perspectivas terapéuticas," *Infectio*, 10(3), 186-197, 2006.
- [41] E. R. García Calvo, "Anticuerpos monoclonales en el tratamiento de cáncer," tesis, Universidad Complutense, Madrid, España, 2016.
- [42] B. Laffleur, V. Pascal, C. Sirac, and M. Cogné, "Production of human or humanized antibodies in mice," *Antibody Methods and Protocols. Methods in Molecular Biology (Methods and Protocols)*, G. Proetzel and H. Ebersbach, Eds. Nueva Jersey: Humana Press, 2012.
- [43] P. Mayrhofer and R. Kunert, "Nomenclature of humanized mAbs: Early concepts, current challenges and future perspectives," *Human Antibodies*, 27, 37-51, 2019.
- [44] S. A. Yeoh, S. S. Dias, and D. A. Ienberg, "Advances in systemic lupus erythematosus," *Medicine*, 46(2), 84-92, 2018.
- [45] Food and Drug Administration (2019, April 26). FDA approves first treatment for pediatric patients with lupus. [En línea]. Disponible en: <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-treatment-pediatric-patients-lupus>
- [46] U. Hafeez, H. K. Gan, and A. M. Scott, "Monoclonal antibodies as immunomodulatory therapy against cancer and autoimmune diseases," *Current Opinion in Pharmacology*, 41: 114-121, 2018.
- [47] F. Marcondes and M. Scheinberg, "Belimumab in the treatment of systemic lupus erythematosus: An evidence based review of its place in therapy," *Autoimmunity Reviews*, 17(2), 103-107, 2018.

- [48] S. V. Navarra, R. M. Guzmán, A. E. Gallacher, S. Hall, R. A. Levy, R. E. Jimenez *et al.*, "Efficacy and safety of belimumab in patients with active systemic lupus erythematosus: A randomized, placebo-controlled, phase 3 trial," *The Lancet*, 377(9767), 721-731, 2011.
- [49] R. Furie, M. Petri, O. Zamani, R. Cervera, D. J. Wallace, D. Tegzová *et al.*, "A phase III, randomized, placebo-controlled study of belimumab, a monoclonal antibody that inhibits B lymphocyte stimulator, in patients with systemic lupus erythematosus," *Arthritis & Rheumatism*, 63(12), 3918-3930, 2011.
- [50] D. Ramsköld, I. Parodis, T. Lakshmikanth, N. Sippl, M. Khademi, Y. Chen *et al.*, "B cell alterations during BAFF inhibition with belimumab in SLE," *EbioMedicine*, 40, 517-527, 2019.
- [51] National Institute for Health and Care Excellence, "Belimumab for treating active autoantibody-positive systemic lupus erythematosus," National Institute for Health and Care Excellence, Londres, Technology Appraisal Guidance, TA397, 2016.
- [52] Ministerio de Salud (2019, mayo 30). Consulta de productos registrados en plataforma. [En línea]. Disponible en: <http://registrelo.go.cr/cfm/ms/consultasPublicas/>
- [53] J. Sopp and M. S Cragg. "Deleting malignant B cells with second-generation anti-CD20 antibodies," *Journal of Clinical Oncology*, 36(22), 2323-2325, 2018.
- [54] L. Lei, S. Muhammad, M. Al-Obaidi, N. Sebire, I. L. Cheng, D. Eleftheriou *et al.*, "Successful use of ofatumumab in two cases of early-onset juvenile SLE with thrombocytopenia caused by a mutation in protein kinase C  $\delta$ ," *Pediatric Rheumatology*, 16(1), 61, 2018.
- [55] J. Bakshi, M. Ismajli, and A. Rahman, "New therapeutic avenues in SLE," *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 26(6), 794-809, 2015.
- [56] F. Speth, C. Hinze, and R. Häfner, "Combination of ofatumumab and fresh frozen plasma in hypocomplementemic systemic lupus erythematosus: A case report," *Lupus*, 27(8), 1395-1396, 2018.
- [57] A. R. Moschen, H. Tilg, and T. Raine, "IL-12, IL-23 and IL-17 in IBD: Immunobiology and therapeutic targeting," *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 16(3), 185-196, 2019.
- [58] A. Fava and M. Petri, "Systemic lupus erythematosus: Diagnosis and clinical management," *Journal of Autoimmunity*, 96, 1-13, 2019.
- [59] G. M. Doody, L. B. Justement, C. C. Delibrias, R. J. Matthews, J. Lin, M. L. Thomas *et al.*, "A role in B cell activation for CD22 and the protein tyrosine phosphatase SHP," *Science*, 269(5221), 242-244, 1995.
- [60] A. Mohamed, Y. Chen, H. Wu, J. Liao, B. Cheng, and Q. Lu, "Therapeutic advances in the treatment of SLE," *International Immunopharmacology*, 72, 218-223, 2019.
- [61] M. E. Drago Serrano y T. R. Sainz Espuñes, "Sistemas de expresión para proteínas terapéuticas recombinantes," *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 37(1), 38-44, 2006.
- [62] R. W. Carrell, J. O. Jeppsson, C. B. Laurell, S. O. Brennan, M. C. Owen, L. Vaughan *et al.*, "Structure and variation of human  $\alpha$ 1-antitrypsin," *Nature*, 298(5872), 329-334, 1982.
- [63] A. S. Elshikha, Y. Yuan, Y. Lu, M. J. Chen, G. Abboud, M. A. Akbar *et al.*, "Alpha 1 antitrypsin gene therapy extends the lifespan of lupus-prone mice," *Molecular Therapy Methods & Clinical Development*, 11, 131-142, 2018.
- [64] J. Barbado, S. Tabera, A. Sánchez, and J. García-Sancho, "Therapeutic potential of allogeneic mesenchymal stromal cells transplantation for lupus nephritis," *Lupus*, 27(13), 2161-2165, 2018.

# Hybrid storage engine for geospatial data using NoSQL and SQL paradigms

## Un motor de almacenamiento híbrido para datos geoespaciales integrando los paradigmas NoSQL y SQL

José A. Herrera-Ramírez<sup>1</sup>, Marlen Treviño-Villalobos<sup>2</sup>,  
Leonardo Víquez-Acuña<sup>3</sup>

---

*Fecha de recepción: 12 de noviembre de 2019*

*Fecha de aprobación: 9 de marzo de 2020*

Herrera-Ramírez, J. A.; Treviño-Villalobos, M;  
Viquez-Acuña, L. Hybrid storage engine for geospatial data  
using NoSQL and SQL paradigms. *Tecnología en Marcha*.  
Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 40-54.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4822>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos. Costa Rica.

E-mail: [josehr1108@gmail.com](mailto:josehr1108@gmail.com)

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Campus Local San Carlos. Costa Rica.

E-mail: [mtrevino@tec.ac.cr](mailto:mtrevino@tec.ac.cr).

 <https://orcid.org/0000-0002-1135-0650>

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Campus Local San Carlos. Costa Rica.

E-mail: [lviquez@tec.ac.cr](mailto:lviquez@tec.ac.cr)



## Keywords

Database; SQL; NoSQL; TorODB; MongoDB; PostgreSQL; replication; mirroring.

## Abstract

The design and implementation of services to handle geospatial data involves thinking about storage engine performance and optimization for the desired use. NoSQL and relational databases bring their own advantages; therefore, it is necessary to choose one of these options according to the requirements of the solution. These requirements can change, or some operations may be performed in a more efficient way on another database engine, so using just one engine means being tied to its features and work model. This paper presents a hybrid approach (NoSQL-SQL) to store geospatial data on MongoDB, which are replicated and mapped on a PostgreSQL database, using an open source tool called TorODB Stampede; solutions then can take advantage from either NoSQL or SQL features, to satisfy most of the requirements associated to the storage engine performance. A descriptive analysis to explain the workflow of the replication and synchronization in both engines precedes the quantitative analysis by which it was possible to determine that a normal database in PostgreSQL has a shorter response time than to perform the query in PostgreSQL with the hybrid database. In addition, the type of geometry increases the update response time of a materialized view.

## Palabras clave

Base de datos; SQL; NoSQL; TorODB; MongoDB; PostgreSQL; replicación; base de datos espejo.

## Resumen

El diseño e implementación de servicios para el manejo de datos geoespaciales implica pensar en el rendimiento del motor de almacenamiento y su optimización para cada uso deseado. Las bases de datos relacionales y no relacionales aportan sus propias funcionalidades, por lo tanto, es necesario elegir una de estas opciones de acuerdo con los requisitos de la solución. Estos requisitos pueden cambiar o tal vez algunas operaciones puedan realizarse de manera más eficiente en otro motor de base de datos, por lo que usar solo un motor significa estar vinculado a sus características y modelo de trabajo. Este artículo presenta un enfoque híbrido (NoSQL-SQL) para almacenar datos geoespaciales en MongoDB, estos datos son replicados y mapeados en una base de datos PostgreSQL, utilizando una herramienta de código abierto llamada TorODB Stampede; las soluciones pueden aprovechar las funciones NoSQL o SQL para satisfacer la mayoría de los requisitos asociados con el rendimiento del motor de almacenamiento. Aquí se presenta un análisis descriptivo para explicar el flujo de trabajo de la replicación y sincronización en ambos motores; además, el análisis cuantitativo, mediante el cual se logró determinar que una base de datos normal en PostgreSQL tiene un tiempo de respuesta menor que realizar la consulta en PostgreSQL con la base de datos híbrida; asimismo, que el tipo de geometría incrementa el tiempo de respuesta de actualización de una vista materializada.

## Introduction

Finding the proper database for a solution can be vital when talking about performance or any other specific requirement. The set of database engines that support geographic data is limited on both relational and non-relational paradigms, so every key aspect is important when deciding between multiple options: "... the success of geospatial application in any project depends upon

the selection, collection, sorting and end-usage of data” [1]. Therefore, the database engine features are an important aspect when deciding which one to use in order to satisfy the data management requirements.

In general, NoSQL databases in the non-relational databases paradigm are effective when handling huge amounts of data due to their ability to scale horizontally, the speed of simple operations, the facility to replicate and distribute data between several servers, and the fact of not being tied to a rigid defined structure, which gives them flexibility, among other aspects [2]. In the last years, these databases have been growing with support on geospatial data handling [3], implementing features such as geographic indexing and some usual spatial operations, also increasing compatibility with external geographic tools such as GeoServer.

On the other hand, relational databases are efficient when handling large amounts of data that have a fixed structure and guarantee ACID (atomicity, consistency, isolation, durability) properties in transactions [4]. Some of them also have better geospatial support than most NoSQL engines, providing more complex spatial operations and indexes; they are more easily compatible with other geospatial tools like Mapserver and QGIS [5].

Knowing the main features of both paradigms could help when making a decision to define a storage engine for a specific solution, but the requirements might change as this solution evolves in time, demanding more needs that the current paradigm could not support at his best. Being tied to just relational or non-relational paradigms means that solutions cannot take advantage from the features of the other one, so it would be helpful to achieve a hybrid approach to benefit from both paradigms’ features [4]. A hybrid database model is a database system that uses two or more different database models in a system [6] and functions as an abstraction layer that sits on top of databases, for example in the paradigms SQL and NoSQL [7]. Some benefits in using multiple database models in a system are flexibility [8], increased performance [9, 10, 11], logical distribution [12], their design conceived for the web [6, 13].

Actually, there are some approaches that integrate the SQL and NoSQL paradigms in a hybrid database [6, 9, 14, 15]. However, there are very few papers proposing hybrid databases that work with PostgreSQL and MongoDB. The properties of these databases make them stand out in each of their respective paradigms. PostgreSQL was one of the first databases to address spatial issues [16]. PostgreSQL’s extension, PostGIS [17], is highly optimized for spatial queries [18], and its large quantity of spatial functions make it very relevant. Meanwhile, there are currently over 225 NoSQL databases [19]; in contrast MongoDB, to date, is the only document-based NoSQL database that supports line intersection and point containment queries [18]. Also, both Database Management Systems (DBMS) are open code, and Geoserver (an open source server for sharing geospatial data) [20] is enabled to give them support, because in its version 2.11.4 this tool includes a data connection and publication component from MongoDB.

Another trend in the storage of spatial data is the big data [21, 22, 23, 24]. However, this type of implementation requires very good computing conditions for data storage and processing. In addition, it is necessary to analyze the issue of costs of the different technologies.

The intention of this paper is to provide a descriptive analysis of an hybrid (NoSQL/SQL) storage engine’s setting up approach, supported by MongoDB and PostgreSQL engines, to serve as backend for any WebGIS implementation or other desired use. The approach is based on a MongoDB replica set, that is mapped and maintains a live mirror on a PostgreSQL database, with help of a tool called ToroDB Stampede; the restructuring of mapped data in PostgreSQL through materialized views to be used with PostGIS extension.

An implementation example is explained in the discussion. In the example, 52 geographic shapes are stored in two different MongoDB databases and replicated on PostgreSQL; the results obtained are 294 tables, 52 materialized views and 294 triggers linked to each table. We also intend to analyze the performance characteristics of the relational side of the proposed environment against other PostgreSQL database with geographic shapes imported from QGIS on Shapefile format, by making a statistic from a set of test samples designed with Apache JMeter tool [25].

There are three test scenarios: the first consist on a performance comparison of both PostgreSQL databases with a “select \*” operation from a multipolygon shape with 21 616 tuples; the second is another comparison with a “select Points within a Polygon” operation, where the query results in 47 records; the third scenario is to analyze the time taken to refresh the materialized views on the hybrid approach PostgreSQL database. The main results allowed to determine that a normal database in PostgreSQL has a shorter response time than performing the query in PostgreSQL with the hybrid database. The type of geometry also increases the update response time of a materialized view.

## Methodology

This section is aimed to analyze the methodology followed for the implementation of the hybrid database (view figure 1). It was developed in six phases and lastly, the workflow of the proposed environment, starting with the environment configuration and the necessary tools. The subsequent topic here was the initialization of the ToroDB service for data replication. The third aspect was importing the data into the MongoDB DBMS. Because the process of replicating MongoDB documents in PostgreSQL divides the structures into several tables, a series of materialized views were first generated to unify the data in a single table and facilitate the query process; the implementation of triggers to maintain synchronization of data in the materialized views, a topic addressed in phase 5. The final topic was the evaluation of the proposed hybrid database. This process was meant to serve as a guide for readers to configure hybrid databases for geospatial data integrating the NoSQL and SQL paradigms..

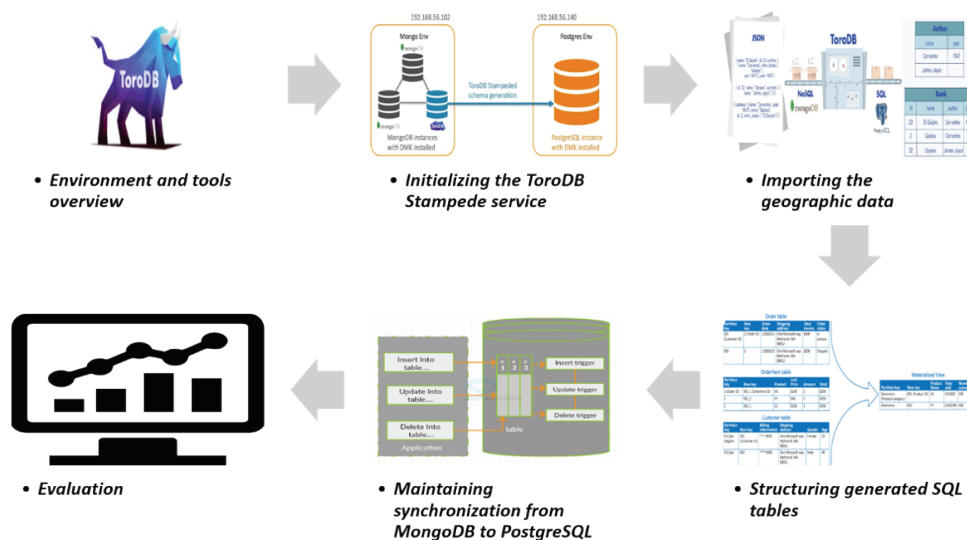


Figure 1. Methodology.

## Environment and tools overview

When talking about NoSQL and SQL main databases with geospatial support, MongoDB comes in front of the few engines that support geographic features. PostgreSQL with PostGIS extension is also one if not the most suitable solution when storing and handling geographic data on relational databases [18]. These two engines and the ToroDB Stampede service set the base of our hybrid storage engine approach.

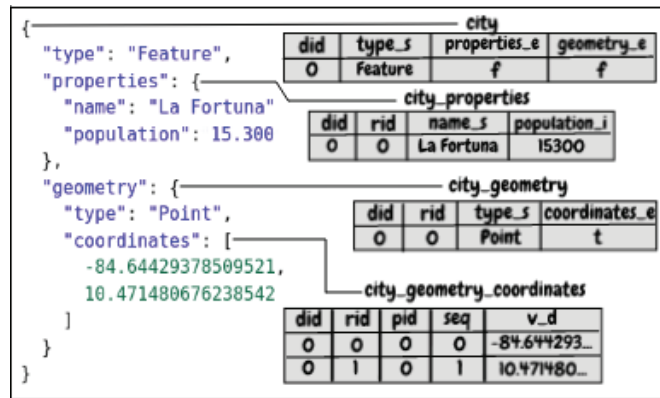
ToroDB Stampede is a replication and mapping technology to maintain a live mirror of a MongoDB replica set in a SQL database; it uses replica set oplog to keep track of the modifications in MongoDB [18]. A replica set is a group of servers where each one runs a separate MongoDB instance and stores the copy of the same data with failover and automatic recovery of member nodes; this redundancy of data provides a level of fault tolerance against the loss of a single database server [26].

Since ToroDB Stampede maps and synchronizes the data unidirectionally, all the maintenance operations must be carried out on the MongoDB replica set. No synchronization is made when doing maintenance operations from PostgreSQL to MongoDB. Stampede maps the JSON structure of a document on MongoDB into a relational schema on PostgreSQL, by taking every document's depth level and creating a table with its simple attributes (string, integers, and other types of data), so any other object or array in the document is considered another depth level and will end as a SQL table with its associated properties and some other metadata columns [18]. See figure 2 for the mapping result of a GeoJSON Point feature data.

Considering this, a simple GeoJSON file imported on the MongoDB replica set could be decomposed in many SQL tables, depending on the geometry type (because of the geometry arrays hierarchy) or the complexity of the table's properties. Therefore, all of these tables have to be recomposed in order to form a functional data structure that PostGIS can handle. The next section will clarify this aspect by analyzing the workflow of the proposed approach.

## Initializing the ToroDB Stampede service

The Stampede service must be running before importing any document from MongoDB. The environment configuration involves initializing the replica set on MongoDB, defining PostgreSQL credentials to be used, and adjusting desired configuration on Stampede service. For detailed information about installing, configuring or any other related topic, refer to ToroDB Stampede official documentation [18].



**Figure 2.** JSON format mapped to SQL schema.

Source: ToroDB Stampede documentation

### Importing the geographic data

Geographic data is available in several formats. Since the data will be primarily stored on the MongoDB replica set, importing it into GeoJSON format is the best and only way to do it. But before importing the GeoJSON file, it has to be prepared in an optimal format for import. We chose to handle the GeoJSON file by leaving just the “features” array, so the whole file would begin as an array of feature objects; this would make MongoDB treat every array element as a document in MongoDB when importing [26], see figure 3.

```

[
  {
    "type": "Feature", "properties": {...},
    "geometry": {...}
  },
  {
    "type": "Feature", "properties": {...},
    "geometry": {...}
  },
  {
    "type": "Feature", "properties": {...},
    "geometry": {...}
  },
  ...
]
    
```

**Figure 3.** JSON file required format to import.

Source: ToroDB Stampede documentation

The preparation of the file can be made with common text editors, or using some special tools for editing large text files. When the file was at the required format, we could import it on the MongoDB replica set by using the Mongoimport tool; but since we were using array notation, we had to explicitly set the `-jsonArray` flag when running the command, and that would import every array element as a document on the replica set [26].



## Structuring generated SQL tables

Once the data has been replicated on the PostgreSQL side, there may be a bunch of generated tables for a single document (view figure 2), as we mentioned before. Depth levels (objects or arrays) properties in the document will be stored in an extra SQL table on PostgreSQL; therefore, because of the nested array on geometries, different types of geometries will mean more or fewer geometry tables.

This leads to the need of a well defined structure to support the spatial data with PostGIS extension. Since the similar geometry types share a common structure, it is a good abstraction practice to define functions that help to recompose the features based on their geometry type, saving this composed structure in some desired schema [27]. Composed SQL structure of a replicated shape will consist on a materialized view that incorporates the identifier, the properties, and the final PostGIS geometry object. Materialized views are a more simple way to define views that can be updated periodically and store data in a table-like form; accessing them is often much faster than accessing the underlying tables directly or through a view [16].

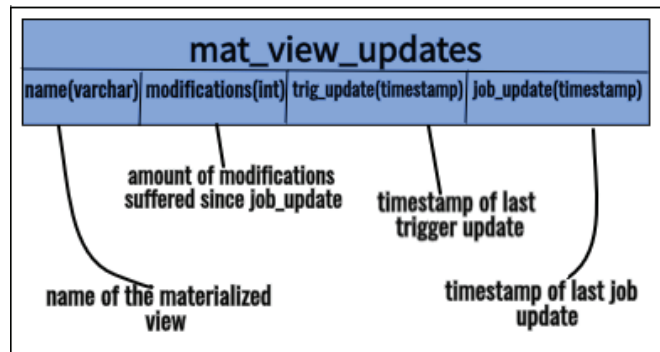
ToroDB service maintains internal schemas on the PostgreSQL target database; it stores metadata about the relation of the MongoDB collections and PostgreSQL tables, document parts and their respective table [28]. Schema ToroDB could be helpful when defining the functions, as it provides better management of the mapped dataset.

The query to create this materialized view needs to be defined by building a query text dynamically. The taken approach in our probe was to define a function that would receive the base table name (collection name), its origin schema, and the target schema where the view would be defined. This would make it easier to select sub-tables by appending the suffix to the base table name. PostGIS supports geometry definition from text with his ST\_GeomFromText function [17], so when building the composing functions, geometry query is correctly defined in a text variable, using aggregate functions to properly gather all the coordinates in an consistent and ordered way, considering all geometry's singularities, such as inner rings on polygons and multiple geometry types on shapes.

## Maintaining synchronization from MongoDB to PostgreSQL

ToroDB automatically keeps synchronization from MongoDB collection changes on the respective generated tables, but since we were not working directly with these tables but with the composed materialized views, changes on these tables needed to be reflected on the materialized views opportunely, according to the availability requirements.

The solution adopted on this approach consist on triggering insertion, update and deletion events on all the generated tables. Then, the trigger handler updates the helper table that describes the materialized views update logs by taking the updated table in the trigger and finding the name of the materialized view that it belongs to. The helper table is represented on figure 4.



**Figure 4.** Helper table columns explained.

The trigger function gets the corresponding materialized view name, with help of ToroDB schema 'doc part' table and then does an upsert operation on the helper table, so if the materialized view name is already inserted, it updates the 'modifications' column by incrementing it in one unit; then it updates the 'trig update' column with the current timestamp.

Lastly, with the helper table working, we can use a scheduled job to analyze it in order to determine if some materialized views need to be refreshed, with help of the job update column on the mentioned helper table. Doing this will avoid to refresh the unnecessary materialized views, saving time and computing cost.

### Relational approaches analysis and tests

In this probe, we also developed a set of tests for comparing the performance of the PostgreSQL replicated database from this approach with another geographic database on PostgreSQL with tables generated from QGIS Shapefile imports. The shapes being tested are downloaded from IDEHN (Spatial Data Infrastructure of the Huetar Norte Region) platform, available at <http://www.idehn.tec.ac.cr/>.

These tests were developed with the Apache JMeter software, an application designed to functional behavior tests and measure performance [25]. With this tool, it is easy to measure performance on databases operations connecting them to JDBC API. A total of six tests were carried out, which are described on table I.

The test suite was executed with an Intel NUC Mini PC with Ubuntu 16.04 that contained an Intel Core i7-7567U quad-core at 3.50Ghz processor, 16GB DDR4 and 512GB SSD.

### Statistical analysis

Each one of the tests described in table 1 was executed 10 times to collect the samples for the statistical analysis. Tests 1 and 2 were for purposes of comparing the replicated database with the normal database (QGIS Shapefile imported), so 10 samples were collected from the replicated database and other 10 samples from the normal database. The tests 3, 4, 5 and 6 were just applied for descriptive analysis of the time elapsed during the executing a "refresh materialized view" operation; these tests were carried out only in the hybrid approach PostgreSQL database.

**Table 1.** Test cases description.

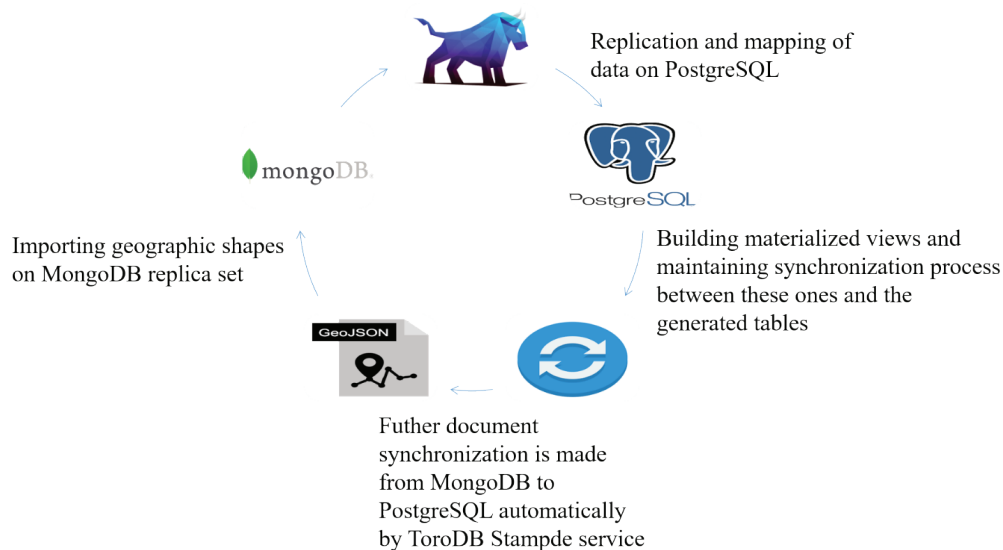
| Test # | Query   | Description   | Test samples (thread iterations) |
|--------|---|---|----------------------------------|
| 1      | Select * from Multipolygon table/view (Both DB's)                         | Performance comparison of both related approaches with the operation "Select all properties" and the geometry from a MultiPolygon table/view. The shape involved was "Cobertura forestal 2005", with 21616 records.   | 2000                             |
| 2      | Select * from Points within a Polygon (Both DB's)                         | Performance comparison of both relational approaches with the operation "Select all properties" and the geometry of the points contained within a polygon. The shape involved were "Bancos (Point)" and "Cantones de la Región Huetar Norte (MultiPolygon)". The query resulted in a total of 47 records. | 2000                             |
| 3      | Refresh combined geometries materialized view (Hybrid approach DB)        | Time measure executing the operation: "Refresh materialized view that contains a set of different geometries" (GeomCollection). The shape involved was taken from an external provider and was unavailable because of private concerns. The view had 34 records of MultiPolygon and Polygon features.     | 100                              |
| 4      | Refresh MultiLineString Geometries materialized view (Hybrid approach DB) | Time measure executing the operation: "Refresh MultiLineString materialized view." The shape involved was "Ríos Región Huetar Norte, Costa Rica". The view had 4150 records.  | 100                              |
| 5      | Refresh Point geometries Materialized view (Hybrid Approach DB)           | Time measure executing the operation: "Refresh Point materialized view." The shape involved was "Poblados Región Huetar Norte, Costa Rica". The view had 658 records.   | 100                              |
| 6      | Refresh MultiPolygon geometries materialized view (Hybrid approach DB)    | Time measure executing the operation: "Refresh MultiPolygon materialized view." The shape involved was "Poblados Región Huetar Norte, Costa Rica". The view had 5366 records.   | 100                              |

For the tests 1 and 2, the quantitative variable response time was evaluated with a normality test of each database samples using the Anderson-Darling statistical tests [29]. Both database samples for each test case were also evaluated using the Levene test for variance [30]; the results were homogeneity of variances. It was verified that the samples were independent with the Fisher exact test [31], which served as input for the performance of the combined analysis of variance (ANOVA) [32]. Each test case was carried out with a significance threshold of = 0,05.

## Results and discussion

### Hybrid storage engine set up

The implementation of this approach resulted in the setup of a hybrid storage engine infrastructure that maintained replication of the data operations from MongoDB in a PostgreSQL database designed for structuring and facilitating handling of the geographic data mapped by ToroDB Stampede service, making both databases suitable for direct geographic data management and enabling flexibility to choose where a geospatial operation should be carried out. See figure 5 for workflow overview.



**Figure 5.** Infrastructure process workflow.

The environment was tested with a storage engine that contained a set of 52 geographic shapes, imported separately on 2 different MongoDB databases. Each shape was imported as a collection to MongoDB, so the final distribution of shapes comprised 46 collections for the first database and other 6 collections for the second one. Also, these collections were distributed in 4 types of geometry (Point, MultiPolygon, MultiLineString and Polygon).

When replicated in PostgreSQL, the first database collections structure generated a total of 264 tables; then these tables were combined to form the materialized views, creating the 46 views (one per each collection). The synchronization process between tables and views was done by binding an event trigger to each generated table, for insertion, update, and deletion of events, giving a total of 264 triggers in this database. The process was the same for the second database, but in this case the 6 shapes imported on MongoDB, replicated, generated 30 tables on the PostgreSQL side, with a result of 6 materialized views and 30 triggers. The total size of the databases in MongoDB was 205,57 MB, for the first, and 10,49 MB, for the second one. The configuration was filtering both MongoDB databases into one PostgreSQL database, separating through schemes on PostgreSQL. This PostgreSQL database before all replication processes had a size of 3028 MB. Note that this included the ToroDB metadata schemas, the functions needed to create views, triggers and other miscellaneous purposes, the two schemas (one per MongoDB database) with their generated tables and materialized views.

## Test results

*First test case (select \* from MultiPolygon table/view)*

The normality test applied to the hybrid database samples gave a  $p$ -value of 0,7477, and to the other database samples, gave a  $p$ -value of 0,5467, suggesting that both data samples were normal. The Levene's test for homogeneity of variance evaluated in both databases samples gave a  $p$ -value of 0,1356, thus proving that the data were homogeneous. The  $p$ -value with the Fisher test was of 0,226, which meant that the samples were independent. In addition, the results of the Anova test are shown in table 2. This test showed that the response time in one database differed significantly from the other. The mean time and the standard deviation from each database samples are shown in table 3.

**Table 2.** Anova results for test case #1.

| DF | Sum square | Mean square | F     | Pr(>F)   |
|----|------------|-------------|-------|----------|
| 1  | 74,50      | 74,5        | 380,7 | 1,48e-13 |

**Table 3.** Statistics from both databases samples on test #1.

| Database                         | Mean    | Standard deviation |
|----------------------------------|---------|--------------------|
| Hybrid                           | 180,496 | 0,56               |
| Normal (QGIS Shapefile imported) | 176,636 | 0,26               |

*Second test case (select \* from Points within a Polygon)*

The same method used in the first test case was carried out here; this time, the normality test applied to the hybrid database samples gave a  $p$ -value of 0,2625, and to the normal database samples, gave a  $p$ -value of 0,3034. Since these values were greater than the level of significance, the data were considered normal. The Levene's test gave a  $p$ -value of 0,1008, so the data were homogeneous. The samples were independent, because the result of the  $p$ -value for the Fisher accuracy test was 0,4737. The results of the Anova test are shown in table 4; they evidenced that there was a significant difference in the response time between both databases. The statistics (mean time, standard deviation) are shown in table 5.

As shown in tables 3 and 5, the normal database is the optimal, as it was proven in both tests cases. The data were less dispersed from the mean on this database, because of a minor standard deviation, but the hybrid approach showed the advantage of a MongoDB instance, that could fill the needs of performance. Future work could be made to enhance the load requests of the environment, giving chance to distribute queries execution between both MongoDB and PostgreSQL databases.

**Table 4.** Anova results for test case #2.

| DF | Sum square | Mean square | F     | Pr(>F)   |
|----|------------|-------------|-------|----------|
| 1  | 4,297      | 4,297       | 234,6 | 9,07e-12 |

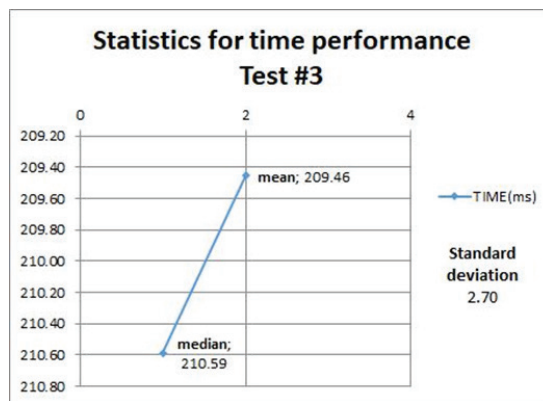
**Table 5.** Statistics from both databases samples on test #2.

| Database                         | Mean   | Standard deviation |
|----------------------------------|--------|--------------------|
| Hybrid                           | 19,142 | 0,1726             |
| Normal (QGIS Shapefile imported) | 18,215 | 0,0824             |

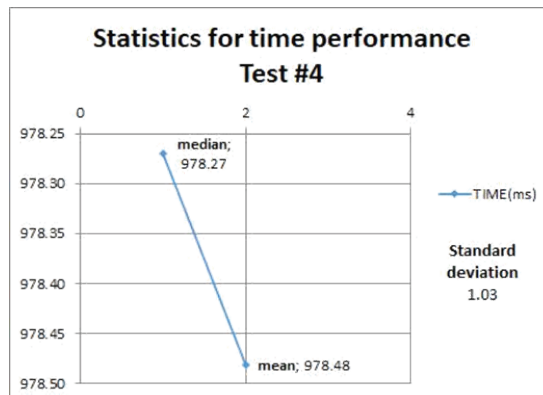
*Refresh materialized view test cases*

The descriptive statistics related to the next four test cases (refresh materialized views operations) are shown to reflect the mean, median, and standard deviation of the time taken to do this operation on the target geometries views. Refer to table 1 for more information.

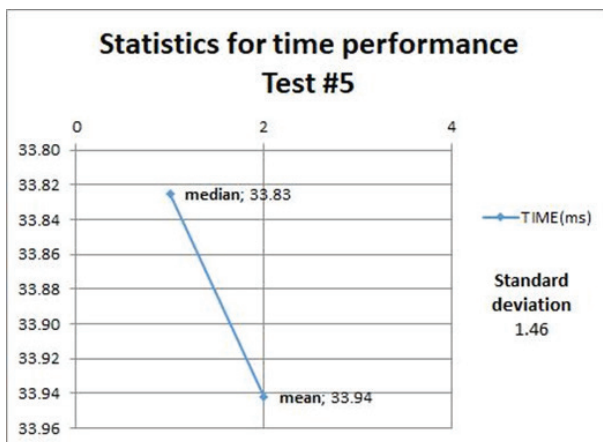
Figures 6, 7, 8, and 9 show that the refreshing operations time increased as the amount data contained in the views increased; this fact has to be taken into consideration if prompt and consistent availability of data is required.



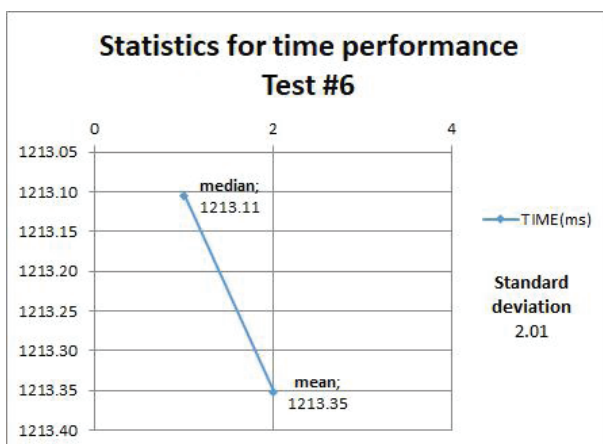
**Figure 6.** Statistics from test case #3.



**Figure 7.** Statistics from test case #4.



**Figure 8.** Statistics from test case #5.



**Figure 9.** Statistics from test case #6.

## Conclusions

A hybrid database was implemented with MongoDB and PostgreSQL managers; the ToroDB tool performed the replication of MongoDB to PostgreSQL. To test its operation, 52 layers of geographic data were imported into 2 databases; the result were 52 collections in MongoDB and 264 tables in PostgreSQL. In addition, 52 views were created to facilitate the process of obtaining data from the layers. 2 queries were also executed to compare the response time of the replicated database with a normal database and 4 queries to perform the descriptive analysis of the time spent in an update operation of a materialized view.

With the execution of queries 1 and 2, it was possible to determine that the normal database in PostgreSQL had a shorter response time than PostgreSQL in the hybrid database. In addition, with the execution of queries 3, 4, 5 and 6, it could be observed that according to the type of geometry, the update response time increased; this was longer in the cases of multi-polygons. Also, for a future work, it could be helpful to define how often a view needs to be refreshed, by analyzing records from the amount of modifications in a job update on the 'mat view updates' helper table showed on figure 3, and taking in count the response time, it would be possible to make the decision to increase or decrease the scheduled job lapse of execution, lightening or adjusting the load of the database engine.

The flexibility allowed here could be useful when building a geoservice to fetch data or compute any other spatial operation, knowing that MongoDB performs better at simple operations (read, insert) or common spatial operations like line intersection and point containment [5]. These types of request can be served from MongoDB directly, while complex operations like spatial joins with filtering or geometry subdivisions can be addressed from the PostgreSQL side.

Since solutions requirements tend to change, having a hybrid approach can facilitate the migration from one storage engine to the other as needs vary, so if the system demands scalability as the amount of data or users grows and grows, MongoDB could serve well for this purpose. On the other hand, PostgreSQL approach can be suitable if there is a need of compatibility with other tools or business intelligence solutions, also if the geospatial data management requires complex operations that are not supported by the non-relational side.

## References

- [1] S. Deogawanka, «Empowering GIS with Big Data,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.gislounge.com/empowering-gis-big-data/>.
- [2] R. Cattell, «Scalable SQL and NoSQL data stores,» *Acm Sigmod Record*, vol. 39, n° 4, pp. 12-27, December 2010.
- [3] M. López, S. Couturier, and J. López, "Integration of NoSQL Databases for Analyzing Spatial Information in Geographic Information System," *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2016 8th International Conference on*, pp. 351-355, December 2016.
- [4] M. A. Colorado Pérez, «NoSQL: ¿es necesario ahora?,» *Tecnología Investigación y Academia*, vol. 5, n° 2, pp. 174-179, 2017.
- [5] E. Baralis, A. Dalla Valle, P. R. C. Garza, and F. Scullino, "SQL versus NoSQL databases for geospatial applications," in *2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Boston, MA, USA, 2017.
- [6] G. Ongo and G. Putra Kusuma, "Hybrid Database System of ; Gede Putra KusumaMySQL and MongoDB in Web Application Development," in *2018 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*, Jakarta, 2018.
- [7] S. Goyal, P. P. Srivastava, and A. Kumar, "An overview of hybrid databases," in *Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), 2015 International Conference*, Noida, 2015.
- [8] E. Şafak, A. Furkan, and T. Erol, "Hybrid Database Design Combination of Blockchain And Central Database," in *3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turquía, 2019.
- [9] H. R. Vyawahare, P. P. Karde, and V. M. Thakare, "Hybrid Database Model For Efficient Performance," *Procedia Computer Science*, vol. 152, pp. 172-178, 2019.
- [10] Z. Pang, S. Wu, H. Huang, Z. Hong, and Y. Xie, "AQUA+: Query Optimization for Hybrid Database-MapReduce System. In (pp. 199-206). IEEE.," in *2019 IEEE International Conference on Big Knowledge (ICBK)*, Beijing, China, 2019.
- [11] J. Arulraj, A. Pavlo, and P. Menon, "Bridging the archipelago between row-stores and column-stores for hybrid workloads," in *2016 International Conference on Management of Data*, 2016.
- [12] A. P. Costa and J. Oliveira, "Design and modeling of a hybrid database schema: transactional and analytical.," in *17th Conference of the Portuguese Chapter of the Association of Information Systems (CAPSI)*, Guimarães, Portugal, 2017.
- [13] I. Zečević and P. Bjeljic, "Model driven development of hybrid databases," in *7th International Conference on Information Society and Technology ICIST*, 2017.
- [14] U. Goswami, R. Singh, and V. Singla, "Implementing hybrid data storage with hybrid search," in *Proceedings of the Third International Conference on Advanced Informatics for Computing Research*, 2019.
- [15] C. Wu, Q. Zhu, Y. Zhang, Z. Du, X. Ye, H. Qin, and Y. Zhou, "A NOSQL–SQL hybrid organization and management approach for real-time geospatial data: A case study of public security video surveillance," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 6, no. 1, p. 21, 2017.
- [16] The PostgreSQL Global Development Group, "PostgreSQL 10.3 Released!" *The World's Most Advanced Open Source Database*, [Online]. Available: <https://www.postgresql.org/>. [Accessed 7 march 2018].





- [17] Developers, PostGIS, "PostGIS — Spatial and Geographic Objects for PostgreSQL," [Online]. Available: <https://postgis.net/>. [Accessed 9 march 2018].
- [18] S. Agarwal and K. S. Rajan, "Performance analysis of MongoDB versus PostGIS/PostgreSQL databases for line intersection and point containment spatial queries," *Spatial Information Research*, vol. 24, no. 6, pp. 671-677, 2016.
- [19] NoSQL, "NoSQL," [Online]. Available: <http://nosql-database.org>. [Accessed 14 march 2018].
- [20] geoserver.org, Geoserver, 2014.
- [21] X. Liu, L. Hao, and W. Yang, "BiGeo: A Foundational PaaS Framework for Efficient Storage, Visualization, Management, Analysis, Service, and Migration of Geospatial Big Data—A Case Study of Sichuan Province, China," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 10, p. 449, 2019.
- [22] Z. Lv, X. Li, H. Lv, and W. Xiu, "BIM Big Data Storage in WebVRGIS," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 2566 - 2573, 2020.
- [23] B. Shangguan, P. Yue, Z. Wu, and L. Jiang, "Big spatial data processing with Apache Spark," in *2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics*, Fairfax, VA, USA, 2017.
- [24] I. Simonis, «Geospatial Big Data Processing in Hybrid Cloud Environments,» de *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, España, 2018.
- [25] Apache Software Foundation, "Apache JMeter," [Online]. Available: <http://jmeter.apache.org/>. [Accessed 5 december 2017].
- [26] MongoDB, "The MongoDB 3.4 Manual," [Online]. Available: <https://docs.mongodb.com/v3.4/>. [Accessed 6 december 2017].
- [27] J. M. Cavero Barca, B. V. Sánchez, and P. C. García De Marina, "Evaluation of an Implementation of Cross-Row Constraints Using Materialized Views," *ACM SIGMOD Record*, vol. 48, no. 3, pp. 23-28, 2019.
- [28] 8Kdata, "ToroDB," 2016. [Online]. Available: <https://www.8kdata.com/torodb>. [Accessed 19 april 2016].
- [29] T. W. Anderson and D. A. Darling, "A test of goodness of fit," *Journal of the American statistical association*, vol. 49, no. 268, pp. 765-769., 1954.
- [30] J. L. Gastwirth, Y. R. Gel, and W. Miao, "The Impact of Levene's Test of Equality of Variances," *Statistical Theory and Practice Statistical Science*, vol. 24, no. 3, pp. 343-360, 2009.
- [31] M. Raymond and F. Rousset, "An exact test for population differentiation," *Evolution*, vol. 49, no. 6, pp. 1280-1283, 1995.
- [32] M. Terrádez and A. A. Juan, "Análisis de la varianza (ANOVA)," 2003.

# Secuenciación de operaciones por simulación en la empresa Puntadas, S.G.

## Sequencing of operations by simulation in the company Puntadas, S.G.

Erik Orozco-Crespo<sup>1</sup>, Neyfe Sablón-Cossío<sup>2</sup>,  
Yadamy Rodríguez-Sánchez<sup>3</sup>, Jenifer Cristina González-Garzón<sup>4</sup>,  
Fabiola Sánchez-Galván<sup>5</sup>






Fecha de recepción: 12 de noviembre de 2019

Fecha de aprobación: 27 de febrero de 2020

Orozco-Crespo, E; Sablón-Cossío, N;  
Rodríguez-Sánchez, Y; Cristina González-Garzón, J;  
Sánchez-Galván, F. Secuenciación de operaciones por simu-  
lación en la empresa Puntadas, S.G. *Tecnología en Marcha*.  
Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 55-68.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4823>



- 1 Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.  
Correo electrónico: [erorozco@utm.edu.ec](mailto:erorozco@utm.edu.ec)  
 <https://orcid.org/0000-0003-2811-6243>
- 2 Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.  
Correo electrónico: [nsablon@utm.edu.ec](mailto:nsablon@utm.edu.ec)  
 <https://orcid.org/0000-0002-6691-0037>
- 3 Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.  
Correo electrónico: [yadamy.sanchez@umcc.cu](mailto:yadamy.sanchez@umcc.cu)  
 <https://orcid.org/0000-0003-1582-8567>
- 4 Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.  
Correo electrónico: [cgonzalez@utn.edu.ec](mailto:cgonzalez@utn.edu.ec)  
 <https://orcid.org/0000-0003-0019-2033>
- 5 Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Veracruz, México.  
Correo electrónico: [fsgalvan01@gmail.com](mailto:fsgalvan01@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-6534-3210>

## Palabras claves

Secuenciación; simulación; reglas de prioridad; programación de las operaciones.

## Resumen

La secuenciación de los pedidos de los clientes es un reto para la programación de las operaciones en una empresa. Este se complejiza todavía aún más si se trata de una empresa del sector textil, debido a que responde a pedidos cada vez más personalizados. El orden que se les dé a estos pedidos repercute significativamente en el desempeño de las operaciones. En este contexto se diseñó un modelo de simulación en FlexSim para medir el impacto de la aplicación de diferentes reglas de prioridad para la secuenciación de los pedidos de los clientes en el caso de las operaciones de la empresa "Puntadas, S.G.". Los resultados fueron presentados al secuenciar los pedidos correspondientes a cuatro semanas del Programa Maestro de Producción (MPS) en el modelo de simulación. Con esto se determinó que la regla de prioridad *Shortest Processing Time* (SPT) sería la que mejor impactaría el desempeño general de las operaciones, sobre todo mediante un aumento en la fiabilidad de un 4.49%, respecto a la regla *First-Come First-Served* (FCFS) que es la implementada en la actualidad.

## Abstract

The sequencing of customer orders is a challenge for scheduling operations in a company. This becomes even more complex if it is a company in the textile sector, since it responds to increasingly personalized orders. The order given to these orders has a significant impact on the performance of operations. In this context, a simulation model was designed in FlexSim to measure the impact of the application of different priority rules for the sequencing of customer orders in the case of the operations of the company "Puntadas, S.G.". The results were presented by sequencing the orders corresponding to four weeks of the Master Production Program (MPS) in the simulation model. With this, it was determined that the Shortest Processing Time (SPT) priority rule would be the one that would best impact the general performance of operations, especially through an increase in reliability of 4.49%, compared to the First-Come First-Served rule. (FCFS) which is currently implemented.

## Keywords

Sequencing; simulation; priority rules; operation scheduling.

## Introducción

El sistema de producción en una industria es parte del éxito o fracaso de ella [1], y cuenta con variables de entrada, de proceso y de salida, alineadas con la estrategia global empresarial [2]. Este se enfoca en las necesidades de los clientes y en los pedidos para la programación de la producción a corto, mediano y largo plazo [3].

La complejidad de los sistemas de producción se ha venido acrecentando en la medida en que el mercado se ha vuelto más exigente, como consecuencia de la evolución de la fabricación en masa a la fabricación de productos más individualizados [4]. Los mercados actuales definen los requerimientos de la industria; estos requerimientos reflejan un alto sentido de personalización, puesto que, en la última década, el rápido cambio de los productos se está convirtiendo en un estilo de vida. Los clientes esperan mejor calidad, mayor variedad y mejor rendimiento de los productos [5]. En estas circunstancias, aspectos como la flexibilidad, la adaptabilidad y la rapidez de respuesta han pasado de ser deseables a convertirse en la clave del éxito en

muchas empresas [6] y en elementos que considerar en la planificación de la producción. La metodología que se asuma para alcanzar tales fines debe conducir a la obtención de resultados útiles [7].

La secuenciación de operaciones forma parte del nivel de planificación a corto plazo [3, 8]. Es una rama de la optimización matemática que ha desarrollado su propia metodología utilizando herramientas matemáticas y computacionales variadas [9]. Su objetivo es la asignación de tareas con un conjunto limitado de recursos disponibles en un intervalo fijado, en las que se aplican determinados criterios para su optimización [10].

En las últimas décadas, debido a los avances en el área de la informática, las nuevas formas de producción (tecnología 3D) y la elaboración de materiales alternativos, la toma de decisiones en el diseño de productos y procesos ha avanzado notablemente [11]. En este sentido, la simulación de estos sistemas a partir del desarrollo de lenguajes de programación y software comerciales constituye una de las técnicas más empleadas en la Investigación de Operaciones y Ciencias de la Administración [12].

Para una correcta secuenciación, el criterio de determinación de las reglas de prioridad es de fundamental relevancia a la hora de minimizar costos y tiempos de procesamiento. La simulación constituye una herramienta importante que se puede utilizar para cotejar distintas reglas de secuenciación [13]. Además, permite el estudio de sistemas donde intervienen una gran cantidad de variables (muchas de índole aleatorio), sin la necesidad de modificar el proceso real, logrando obtener un mejor entendimiento de su comportamiento y poder experimentar en la búsqueda de mejoras y soluciones a la problemática que se defina [14]. Con este entorno se relaciona el planteamiento del estudio de caso que aquí se trata, caso perteneciente al sector textil de la provincia Imbabura en el Ecuador.

La fábrica Puntadas, S.G., ubicada en Imbabura, Ecuador, se dedica a la producción de ocho tipos de camisetas en un proceso productivo *job-shop* que funciona bajo pedidos, es decir, en un sistema *make to order*. Dichas características lo hacen un proceso productivo difícil de planificar en el corto plazo.

Los pedidos de los clientes son receptados por el Gerente y se les establece una fecha de entrega que es convenida entre las partes. El Gerente define la fecha de entrega sobre la base de su experiencia. La secuenciación de estos pedidos se realiza mediante la regla de prioridad *first-come, first-served* (FCFS), considerando la fecha de recepción del pedido, es decir que se comienza a trabajar en los pedidos en el mismo orden en el que son receptados por el Gerente.

Durante el desarrollo del trabajo se manifestó que existen incumplimientos en la fecha de entrega de los pedidos a los clientes, lo que se traduce en afectación de la fiabilidad de las operaciones. A lo anterior se añade que no se han desarrollado investigaciones que permitan detectar si otras reglas de prioridad pudieran mejorar el desempeño de las operaciones en el corto plazo.

Ante tal situación, el objetivo principal del trabajo que aquí se resume se determinó como el de diseñar un modelo de simulación en FlexSim para medir el desempeño de las operaciones en la empresa "Puntadas S.G.", secuenciando la producción por medio de diferentes reglas de prioridad.

## **Aplicaciones de la simulación a los problemas de secuenciación de la producción**

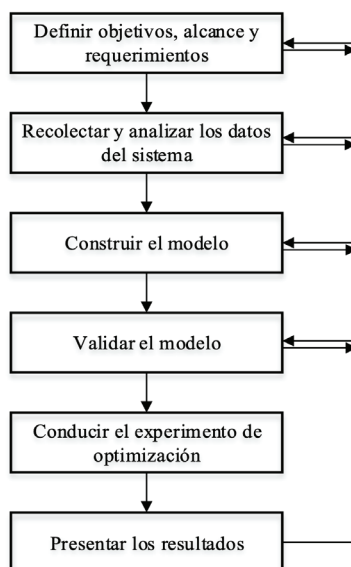
La simulación permite a los gerentes evaluar el desempeño de todos los aspectos relacionados con los procesos y las operaciones, considerando todos los parámetros que puedan afectar

su desempeño [15, 16]. Disímiles autores han contextualizado su empleo a los problemas de secuenciación de pedidos. Ejemplo de ello son sus aplicaciones:

- En el impacto que tendría en el rendimiento del sistema el empleo de las diferentes reglas de prioridad para definir la secuencia en cada una de las estaciones de trabajo [17, 18].
- En la elaboración de órdenes de trabajo en el menor tiempo posible, en una empresa con un ambiente de producción tipo taller [19].
- En la didáctica como soporte al aprendizaje de la secuenciación de trabajos en una configuración de producción del tipo *job-shop* [20].
- En el estudio reportado por Ang y autores [13], se experimentó mediante simulación con varias reglas de secuenciación en una empresa real cuyo sistema de producción corresponde a un *job-shop*. Entre las reglas aplicadas, ellos mencionan *shortest setup time* (SST), *shortest processing time* (SPT), *shortest processing and setup time* (SPST), *earliest due date* (EDD), *least process* (LP) y *lowest volume* (LV). Midieron el desempeño con cada regla de acuerdo con el inventario en proceso y el tiempo total de elaboración.
- En la comparación y validación de 30 reglas de secuenciación en un *job-shop*, midiendo el desempeño bajo diferentes funciones objetivo. Entre las reglas aplicadas están *first-input first-output* (FIFO), *last-input first-output* (LIFO), *long process time* (LPT), *shortest processing time* (SPT) y como funciones objetivo, miden el tiempo medio de flujo, el retraso promedio y el máximo retraso [21].
- En la modelación de redes para minimizar el *makespan* al programar un *job-shop*, evaluando el desempeño por comparación entre diferentes reglas de secuenciación: FIFO, LIFO, *highest value first* (HVF), *lowest value first* (LVF) [22].

## Metodología

Para la realización del estudio de simulación es necesario definir una metodología lógica y sistémica que garantice que el modelo funcione, lo cual se hizo con base en el estudio descrito por Hermoso-Ayala [29]. La figura 1 muestra la naturaleza iterativa del proceso para realizar un trabajo de simulación.



**Figura 1.** Proceso iterativo de la simulación. Fuente: [23].

## Definir objetivos, alcance y requerimientos

En estrecha relación con el planteamiento de los objetivos, es necesario identificar con claridad el sistema que modelar, es decir, contar con la información suficiente para establecer el modelo conceptual para el caso de estudio [24, 25]. Los objetivos deben ser planteados de forma tal que guarden especial relación con las variables de respuesta y de decisión del modelo. Las primeras se definen a partir de un análisis de sensibilidad; mientras que las segundas, por medio de un análisis de la mejor configuración para alcanzar los objetivos de rendimiento deseados en la optimización [23].

## Recolectar y analizar los datos del sistema

En este paso se procede a dividir los datos en tres categorías: estructurales, operacionales y numéricos. En la primera se consideran la cantidad de locación de recursos, así como las redes de abastecimiento a los puestos de trabajo. El análisis de los datos operacionales permite explicar cómo opera el sistema, es decir, cuándo, dónde y cómo se realizan las actividades [26].

Los datos numéricos representan la información útil para la determinación de las distribuciones de probabilidad asociadas a cada una de las variables aleatorias necesarias para la simulación [27], lo que significa que, si no se cuenta con la información requerida o se desconfía de ella, es necesario realizar un estudio estadístico del comportamiento de dichas variables, para luego proceder a incluirlas en el modelo [25].

## Construir el modelo

La construcción del modelo consiste en realizar una representación simplificada de la realidad. Es importante tomar en cuenta que una actividad debe considerarse siempre en términos de su efecto sobre otros elementos del sistema, en lugar de la forma detallada en la que se lleva a cabo [28]. Tales mecanismos detallados son intrascendentes para las entidades globales del flujo y utilización de los recursos.

El modelo se construye con base en elementos estructurales, tales como máquinas, personas, elementos de trabajo y áreas de trabajo, ya antes definidos. Es necesario precisar el comportamiento de los diferentes elementos físicos en el sistema y cómo interactúan. Estos incluyen hojas de ruta, operaciones, las llegadas, el movimiento de recursos, reglas de selección de tareas, horarios de recursos y los tiempos de parada y reparaciones [23].

## Validar el modelo

El proceso de validación se garantiza, principalmente, desde la misma programación de los modelos [29, 30]. Posteriormente, es necesaria la realización de una serie de pruebas simultáneas con información de entrada real para observar su comportamiento y analizar sus resultados. El propósito en este paso corresponde a obtener un comportamiento similar al que se presenta en el proceso real si es que este existe; de no ser el caso, la validación consiste en introducir algunos escenarios sugeridos por el cliente y demostrar su congruencia [25, 31].

## Conducir el experimento de optimización

Este paso comienza realizando un análisis de sensibilidad como parte del estudio de optimización, lo cual implica la realización de corridas o réplicas experimentales que permitan hacer comparaciones con el comportamiento histórico del sistema [23, 32]. A partir de estas corridas pilotos, se detectan los momentos en que las variables de respuesta alcanzan la estabilidad y se determina la cantidad definitiva de réplicas que ejecutar, asumiendo un nivel de

confianza y los niveles de exactitud arrojados por las desviaciones típicas determinadas en las variables de respuesta. Dunna y autores [25] hacen énfasis en generar escenarios pesimistas, intermedios y optimistas, que permitan determinar la influencia de variables independientes en las principales variables de respuesta consideradas (variables dependientes).

## Resultados y discusión

### Definir objetivos, alcance y requerimientos

El alcance del modelo de simulación comprendió el proceso de producción de camisetas en su totalidad. Se consideraron 8 tipos de camisetas como los más representativos en cantidad y frecuencia de producción. Además, se programó la producción de las cuatro semanas pertenecientes al mes de noviembre de 2019, por ser un mes pico en demanda; el Plan Maestro de Producción (MPS) de ese mes se muestra en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** Plan maestro de producción (MPS).

| Semana 1 |   |    |     |     | Semana 2 |    |   |     |    | Semana 3 |     |     |    |    | Semana 4 |     |     |    |     |     |     |     |
|----------|---|----|-----|-----|----------|----|---|-----|----|----------|-----|-----|----|----|----------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| L        | K | M  | J   | V   | L        | K  | M | J   | V  | L        | K   | M   | J  | V  | L        | K   | M   | J  | V   |     |     |     |
|          |   | 50 |     |     | 50       |    |   | 175 |    |          | 175 |     | 85 |    |          |     | 85  |    |     |     | 127 |     |
|          |   | 50 |     |     | 50       |    |   |     |    |          | 0   | 280 | 86 |    |          |     | 366 |    |     | 113 |     |     |
|          |   |    | 135 |     | 135      | 40 |   |     |    |          | 40  |     |    |    |          |     | 0   | 61 |     |     |     | 300 |
|          |   |    | 175 |     | 175      |    |   |     | 85 |          | 85  |     |    |    |          |     | 0   | 61 |     |     |     |     |
|          |   |    |     | 125 | 125      |    |   | 45  |    |          | 45  |     |    |    |          |     | 0   |    | 225 |     |     | 114 |
|          |   | 90 |     |     | 90       |    |   |     | 75 |          | 75  |     |    | 80 |          |     | 80  |    |     |     |     | 85  |
|          |   |    |     |     | 0        |    |   |     | 65 |          | 65  |     |    |    | 98       |     | 98  |    |     |     | 67  |     |
| 70       |   |    |     |     | 70       |    |   | 55  |    |          | 55  |     |    |    |          | 112 | 112 |    |     |     | 63  |     |

La empresa procesa los pedidos de los clientes bajo la regla FCFS y posee como uno de sus objetivos estratégicos el de “cumplir los pedidos de los clientes dentro del plazo convenido con ellos”. De lo anterior se dedujo que la fiabilidad de la respuesta constituye una de sus principales prioridades.

El objetivo general de la simulación fue el de crear un modelo en FlexSim que permitiera medir el desempeño del sistema productivo de la Empresa Puntadas S.G., secuenciando la producción por medio de diferentes reglas de prioridad.

Objetivos específicos de la simulación:

1. Medir el desempeño actual del sistema productivo de la Empresa, secuenciando la producción mediante la regla de prioridad FCFS.
2. Medir el impacto de otras reglas de prioridad en las variables de respuesta del modelo.
3. Analizar cuál regla de prioridad es la que mejor se ajusta a los objetivos estratégicos de la empresa, en específico en el área de operaciones.

Se definió como variable independiente del modelo la asociada a las reglas de prioridad. Se consideraron las reglas siguientes: FCFS, con código 1; EDD, con código 2; SPT, con código 3, y la regla *critical ratio* (CR), con código 8.

Se definieron como variables de respuesta o dependientes las que se detallan en el cuadro 2.

**Cuadro 2.** Variables de respuesta.

| Objetivos específicos de la simulación   | Variable dependiente   | Denominación | UM      |
|--|--|--------------|---------|
| Determinar el tiempo promedio de flujo de los pedidos según la regla de prioridad $k$    | Media del tiempo promedio de flujo   | $TPF_k$      | min.    |
| Determinar el tiempo promedio de adelanto de los pedidos según la regla de prioridad $k$ | Media del tiempo promedio de adelanto  | $TPA_k$      | min.    |
| Determinar el tiempo promedio de retraso de los pedidos según la regla de prioridad $k$  | Media del tiempo promedio de retraso   | $TPR_k$      | min.    |
| Determinar el promedio de la producción en proceso según la regla de prioridad $k$       | Media de la producción en proceso  | $WIP_k$      | pedido  |
| Determinar la productividad del proceso según la regla de prioridad $k$                  | Media de la productividad del proceso de producción  | $Pt_k$       | u./min. |
| Determinar la fiabilidad del proceso según la regla de prioridad $k$                     | Media de la fiabilidad del proceso de producción, calculada como el porcentaje de los pedidos cumplidos dentro del plazo de entrega pactado con los clientes | $F_k$        | %       |

### Recolectar y analizar los datos del sistema

La recolección de los datos se dividió en dos categorías: estructurales y numéricos. Los primeros se definieron como los elementos del sistema: máquinas, producción en proceso, los trabajadores y la distribución en planta de la fábrica. Los segundos se obtuvieron de la toma de datos y el análisis estadístico mediante el empleo de la herramienta *Expertfit* (Módulo de ajuste de curvas de *FlexSim*). Dichos datos numéricos se centraron en los tiempos de las operaciones relacionadas para cada uno de los tipos de camisetas y todos se ajustaron a la distribución normal.

### Construir el modelo

Para la construcción del modelo se añadieron un *source*, *processors*, *queues*, *separator*, *racks*, *task executers* y *dispatchers*<sup>6</sup>, que resultaron en la vista superior del modelo que se muestra en la figura 2.




**Figura 2.** Vista superior del modelo de simulación.

<sup>6</sup> Se decidió no traducir las palabras al español para ser consecuentes con el vocabulario empleado en *FlexSim*.

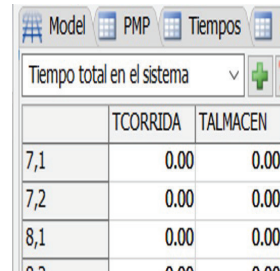


Se añadieron cuatro *Global Tables* y cinco *Global Lists* (ver figura 3).



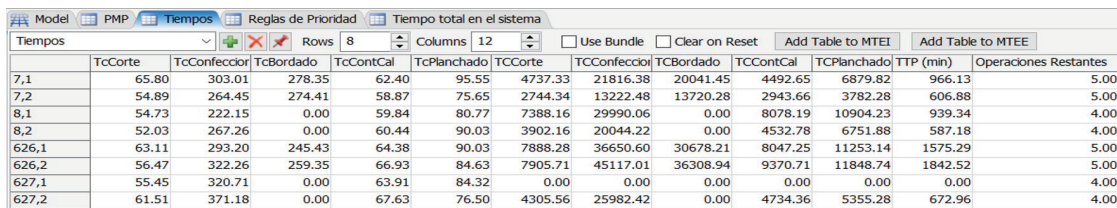
|       | LOTE   | FRecepcion | FEntrega  |
|-------|--------|------------|-----------|
| 7.1   | 72.00  | -115200.00 | 86400.00  |
| 7.2   | 50.00  | -115200.00 | 86400.00  |
| 8.1   | 135.00 | -86400.00  | 115200.00 |
| 8.2   | 75.00  | -86400.00  | 115200.00 |
| 626.1 | 125.00 | 0.00       | 144000.00 |

a) PMP



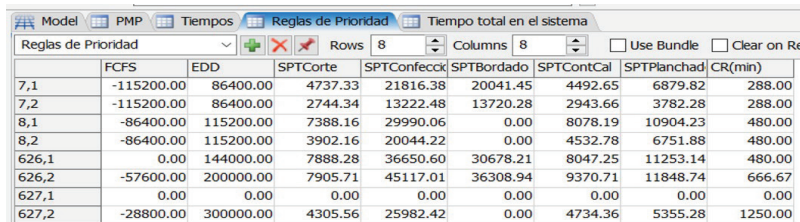
|     | TCORRIDA | TALMACEN |
|-----|----------|----------|
| 7,1 | 0.00     | 0.00     |
| 7,2 | 0.00     | 0.00     |
| 8,1 | 0.00     | 0.00     |

b) Tiempo total en el sistema



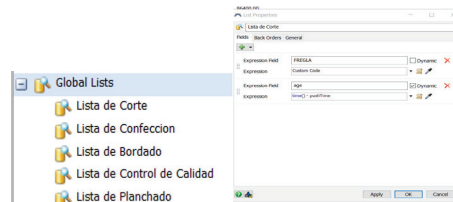
| Tiempos | TcCorte | TcConfeccion | TcBordado | TcContCal | TcPlanchado | TCorte  | TCConfeccion | TCBordado | TCContCal | TCPlanchado | TTP (min) | Operaciones Restantes |
|---------|---------|--------------|-----------|-----------|-------------|---------|--------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------------------|
| 7,1     | 65.80   | 303.01       | 278.35    | 62.40     | 95.55       | 4737.33 | 21816.38     | 20041.45  | 4492.65   | 6879.82     | 966.13    | 5.00                  |
| 7,2     | 54.89   | 264.45       | 274.41    | 58.87     | 75.65       | 2744.34 | 13222.48     | 13720.28  | 2943.66   | 3782.28     | 606.88    | 5.00                  |
| 8,1     | 54.73   | 222.15       | 0.00      | 59.84     | 80.77       | 7388.16 | 29990.06     | 0.00      | 8078.19   | 10904.23    | 939.34    | 4.00                  |
| 8,2     | 52.03   | 267.26       | 0.00      | 60.44     | 90.03       | 3902.16 | 20044.22     | 0.00      | 4532.78   | 6751.88     | 587.18    | 4.00                  |
| 626,1   | 63.11   | 293.20       | 245.43    | 64.38     | 90.03       | 7888.28 | 36650.60     | 30678.21  | 8047.25   | 11253.14    | 1575.29   | 5.00                  |
| 626,2   | 56.47   | 322.26       | 259.35    | 66.93     | 84.63       | 7905.71 | 45117.01     | 36308.94  | 9370.71   | 11848.74    | 1842.52   | 5.00                  |
| 627,1   | 55.45   | 320.71       | 0.00      | 63.91     | 84.32       | 0.00    | 0.00         | 0.00      | 0.00      | 0.00        | 0.00      | 4.00                  |
| 627,2   | 61.51   | 371.18       | 0.00      | 67.63     | 76.50       | 4305.56 | 25982.42     | 0.00      | 4734.36   | 5355.28     | 672.96    | 4.00                  |

c) Tiempos



| Reglas de Prioridad | FCFS       | EDD       | SPTCorte | SPTConfeccion | SPTBordado | SPTContCal | SPTPlanchado | CR(min) |
|---------------------|------------|-----------|----------|---------------|------------|------------|--------------|---------|
| 7,1                 | -115200.00 | 86400.00  | 4737.33  | 21816.38      | 20041.45   | 4492.65    | 6879.82      | 288.00  |
| 7,2                 | -115200.00 | 86400.00  | 2744.34  | 13222.48      | 13720.28   | 2943.66    | 3782.28      | 288.00  |
| 8,1                 | -86400.00  | 115200.00 | 7388.16  | 29990.06      | 0.00       | 8078.19    | 10904.23     | 480.00  |
| 8,2                 | -86400.00  | 115200.00 | 3902.16  | 20044.22      | 0.00       | 4532.78    | 6751.88      | 480.00  |
| 626,1               | 0.00       | 144000.00 | 7888.28  | 36650.60      | 30678.21   | 8047.25    | 11253.14     | 480.00  |
| 626,2               | -57600.00  | 200000.00 | 7905.71  | 45117.01      | 36308.94   | 9370.71    | 11848.74     | 666.67  |
| 627,1               | 0.00       | 0.00      | 0.00     | 0.00          | 0.00       | 0.00       | 0.00         | 0.00    |
| 627,2               | -28800.00  | 300000.00 | 4305.56  | 25982.42      | 0.00       | 4734.36    | 5355.28      | 1250.00 |

d) Reglas de prioridad



e) Global lists

Figura 3. *Global Tables*<sup>7</sup>

1. PMP: Se indicó el tamaño de los pedidos (unidades) y sus correspondientes fechas de recepción y de entrega (segundos). Esta tabla se derivó del MPS de la empresa.
2. Tiempo total en el sistema: Se indicaron los tiempos de corridas simulados para cada ítem y los tiempos de permanencia de los pedidos en almacén hasta la fecha de entrega.

<sup>7</sup> La primera columna de las tablas se corresponde con los códigos manejados por la empresa para identificar los 8 tipos de camisetas.

3. Tiempos (segundos): Se describieron los tiempos de ciclo de cada ítem en las diferentes operaciones del proceso; los tiempos de corrida de los pedidos, determinados al multiplicar el tamaño del pedido por el tiempo de ciclo; el tiempo total de procesamiento de cada pedido al pasar por todas las operaciones, y las operaciones restantes al inicio del proceso de producción de los pedidos.
4. Reglas de prioridad: Las reglas de prioridad consideradas fueron: FCFS, EDD, SPT y CR.
5. Global lists: Las cinco *Global Lists* se correspondieron con cada una de las operaciones del proceso productivo. Estas guiaron la secuenciación entre el almacenamiento previo y la producción, o indicaron la secuenciación entre las operaciones (en los *Queues*) y la operación en sí (*Processor* o *Separator*).

Se programaron funcionalidades del modelo, específicamente en el *Open Model* y en el *Reset Model*, las cuales fueron las responsables de reescribir los valores aleatorios del tiempo de las operaciones en la *Global Table* “Tiempos”, a partir de lo cual se derivaron el resto de los cálculos en las *Global Tables* restantes.

Se colocaron dos *labels* en el *source* del modelo: una para contar la cantidad de pedidos de la semana y la otra para contar cuántos de estos pedidos se entregan atrasados respecto a la fecha programada. Ambas *labels* fueron necesarias para el cálculo de la fiabilidad.

Una *Global Variable* “Regla” definió la regla de prioridad con la que se corrió el modelo. Las variables de respuesta de la tabla 2 fueron programadas en el *Performance Measures* del *Experimenter*.

#### Validar el modelo

El proceso de validación se garantizó, primeramente, a partir de la propia programación del modelo. En tal sentido, se emplearon algunas declaraciones propias de FlexSim, que unidas a informaciones de entrada real, permitieron observar el comportamiento de las variables respuesta y que este fuera congruente con el desempeño real del sistema.

Se creó un *dashboard* para la inclusión de los operarios y para el cálculo de la productividad del sistema, en aras de visualizar si el comportamiento del modelo se asemejaba a la realidad del proceso (ver figura 4).

|                  | State Analysis |              |               |                     |                      |         |       |
|------------------|----------------|--------------|---------------|---------------------|----------------------|---------|-------|
|                  | Total          | travel empty | travel loaded | offset travel empty | offset travel loaded | utilize | idle  |
| <b>Operator1</b> | 58.5%          | 0.1%         | 0.0%          | 0.0%                | 0.0%                 | 58.3%   | 41.5% |
| <b>Operator2</b> | 46.6%          | 0.2%         | 0.1%          | 0.0%                | 0.0%                 | 46.2%   | 53.4% |
| <b>Operator3</b> | 61.0%          | 0.1%         | 0.0%          | 0.0%                | 0.0%                 | 60.9%   | 39.0% |
| <b>Operator4</b> | 28.5%          | 0.9%         | 0.9%          | 0.1%                | 0.8%                 | 25.8%   | 71.5% |

**Figura 4.** *Dashboard* para el análisis de la utilización de cada uno de los operarios.

Se corrieron cincuenta réplicas iniciales para determinar la cantidad de réplicas necesarias que permitieran validar el modelo y estimar las variables de respuesta (ver cuadro 3). Así se demostró que las cincuenta réplicas desarrolladas fueron suficientes para validar el modelo y para estimar las variables de respuesta.

**Cuadro 3.** Cálculo de la cantidad de réplicas necesarias.

| Variable   | UM           |         | S     | LI      | LS      | IC    | e    | Condición<br>$IC \leq 2 * e$ | n     |
|--|--------------|---------|-------|---------|---------|-------|------|------------------------------|-------|
| TPF  | min.         | 1997,00 | 60,00 | 1980,00 | 2014,00 | 34,00 | 20   | Si                           | 36,36 |
| TPA  | min.         | 264,00  | 13,50 | 260,10  | 267,80  | 7,70  | 20   | Si                           | 1,84  |
| TPR  | min.         | 684,00  | 53,00 | 668,00  | 699,00  | 31,00 | 20   | Si                           | 28,37 |
| WIP  | pedido       | 1,82    | 0,05  | 1,81    | 1,83    | 0,03  | 0,25 | Si                           | 0,16  |
| Pt   | u./<br>min.) | 0,22    | 0,01  | 0,22    | 0,22    | 0,00  | 0,01 | Si                           | 2,46  |
| : media. S: desviación estándar. LI: Límite inferior. LS: Límite superior. IC: Amplitud del intervalo de confianza<br>(). e: error que se está dispuesto a asumir en la estimación.<br>n: cantidad de réplicas calculadas a partir de la expresión |              |         |       |         |         |       |      |                              |       |

Además, se comparó la productividad real del proceso con la productividad arrojada por el modelo. Para ello se tomaron veinte datos históricos de productividad semanal (aproximadamente 5 meses) y se compararon con una corrida del modelo (50 réplicas) bajo la regla de prioridad FCFS (ver cuadro 4).

**Cuadro 4.** Productividad para 20 semanas.

| Semana | Producción (u./<br>sem.) | FPD (min./<br>sem.) | Productividad<br>(u./min.) |
|--------|--------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1      | 513                      | 2340                | 0,2192                     |
| 2      | 509                      | 2319                | 0,2194                     |
| 3      | 487                      | 2209                | 0,2204                     |
| 4      | 428                      | 1915                | 0,2235                     |
| 5      | 539                      | 2470                | 0,2182                     |
| 6      | 482                      | 2185                | 0,2206                     |
| 7      | 484                      | 2193                | 0,2205                     |
| 8      | 508                      | 2314                | 0,2194                     |
| 9      | 548                      | 2517                | 0,2179                     |
| 10     | 580                      | 2673                | 0,2168                     |
| 11     | 518                      | 2364                | 0,2190                     |
| 12     | 548                      | 2516                | 0,2179                     |
| 13     | 548                      | 2513                | 0,2179                     |
| 14     | 537                      | 2460                | 0,2183                     |
| 15     | 507                      | 2308                | 0,2195                     |
| 16     | 554                      | 2545                | 0,2177                     |
| 17     | 514                      | 2343                | 0,2192                     |
| 18     | 578                      | 2665                | 0,2169                     |
| 19     | 538                      | 2465                | 0,2183                     |
| 20     | 512                      | 2335                | 0,2193                     |

Dicha comparación se realizó en el *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)* por medio de la prueba T para muestras independientes, probando como hipótesis nula que las productividades observadas en el proceso eran iguales a las productividades obtenidas con el modelo de simulación (ver figura 5).

**Prueba de muestras independientes**

|                       |                                     | Prueba de Levene para la igualdad de varianzas |      | Prueba T para la igualdad de medias |        |                  |                      |                             |   |          |
|-----------------------|-------------------------------------|--|------|-------------------------------------|--------|------------------|----------------------|-----------------------------|---|----------|
|                       |                                     | F  | Sig. | t                                   | gl     | Sig. (bilateral) | Diferencia de medias | Error tip. de la diferencia | 95% Intervalo de confianza para la diferencia |          |
|                       |                                     |  |      |                                     |        |                  |                      |                             | Inferior                                      | Superior |
| Productividad (u/sem) | Se han asumido varianzas iguales    | 20,106   | ,000 | ,213                                | 68     | ,832             | ,0004493             | ,0021072                    | -.0037554                                     | ,0046541 |
|                       | No se han asumido varianzas iguales |  |      | ,330                                | 55,094 | ,743             | ,0004493             | ,0013632                    | -.0022824                                     | ,0031811 |

**Figura 5.** Salida del SPSS para la prueba T, para muestras independientes.

A partir de esta prueba se dedujo que no existía evidencia suficiente como para rechazar la hipótesis nula, a un 5% de nivel de significación, por lo que pudo afirmarse que el modelo de simulación tuvo un comportamiento similar al proceso de producción real, quedando así validado el modelo.

### Presentación de los resultados

Posteriormente a la corrida del modelo para las cuatro semanas y bajo las reglas de prioridad analizadas, se obtuvieron los resultados para las variables de respuesta, que se resumen en el cuadro 5.

**Cuadro 5:** Resultados del modelo para las cuatro semanas en estudio.

| Semana 1 |           |           |           |             |            |        |
|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|--------|
|          | TPF (min) | TPA (min) | TPR (min) | WIP(pedido) | Pt (u/min) | F(%)   |
| FCFS     | 19973     | 2641      | 6843      | 1,8193      | 0,21981    | 42,001 |
| EDD      | 17901     | 1613      | 3741      | 1,2442      | 0,21912    | 27,163 |
| SPT      | 18472     | 1742      | 4442      | 1,2271      | 0,21853    | 30,502 |
| CR       | 17901     | 1613      | 3741      | 1,2442      | 0,21912    | 27,163 |
| Semana 2 |           |           |           |             |            |        |
|          | TPF (min) | TPA (min) | TPR (min) | WIP(pedido) | Pt (u/min) | F(%)   |
| FCFS     | 23663     | 584       | 6842      | 1,8004      | 0,22251    | 26,703 |
| EDD      | 21931     | 1501      | 6031      | 1,5513      | 0,20053    | 33,401 |
| SPT      | 23172     | 1303      | 7073      | 1,5162      | 0,20172    | 25,304 |
| CR       | 25464     | 1382      | 9444      | 1,1491      | 0,15944    | 26,902 |
| Semana 3 |           |           |           |             |            |        |
|          | TPF (min) | TPA (min) | TPR (min) | WIP(pedido) | Pt (u/min) | F(%)   |
| FCFS     | 33023     | 4231      | 12563     | 1,4143      | 0,17751    | 28,003 |
| EDD      | 27461     | 1493      | 4271      | 0,8832      | 0,17222    | 35,302 |
| SPT      | 27642     | 1542      | 4492      | 0,8721      | 0,17103    | 41,201 |
| CR       | 27461     | 1493      | 4271      | 0,8832      | 0,17222    | 35,302 |
| Semana 4 |           |           |           |             |            |        |
|          | TPF (min) | TPA (min) | TPR (min) | WIP(pedido) | Pt (u/min) | F (%)  |
| FCFS     | 24492     | 2143      | 6242      | 2,2812      | 0,20911    | 25,963 |
| EDD      | 24593     | 2143      | 6333      | 2,3103      | 0,20902    | 25,963 |
| SPT      | 21461     | 3221      | 4281      | 1,8101      | 0,20524    | 43,601 |
| CR       | 24684     | 2472      | 6754      | 2,3454      | 0,20773    | 36,762 |

a: Los superíndices en cada valor indican el orden de los resultados de mejor (valor 1) a peor (valor 4).

A partir de estos resultados se pudo observar que las reglas de prioridad arrojaron desempeños diferentes según la estructura, la cantidad de los pedidos y las fechas de recepción y de entrega. En el cuadro 6 se promediaron los superíndices para las cuatro semanas, el total indicó que la regla SPT fue la que mejor desempeño proporcionó de forma general, por lo que en el orden quedó en el primer lugar con el menor de todos los promedios (valor de 2,00).

**Cuadro 6.** Promedio de los superíndices.

|      | TPF  | TPA  | TPR  | WIP  | Pt   | F    | Total |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| FCFS | 2,75 | 2,25 | 2,50 | 2,50 | 1,00 | 2,50 | 2,33  |
| EDD  | 1,50 | 2,50 | 1,50 | 1,50 | 2,25 | 2,25 | 2,08  |
| SPT  | 1,75 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 3,00 | 2,00 | 2,00  |
| CR   | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,75 | 2,25 | 2,46  |

La regla de prioridad SPT permitió que el modelo obtuviera un incremento de la fiabilidad en un 4,49% respecto a la regla FCFS (ver cuadro 7), lo que implicaría una mejora en el cumplimiento de los pedidos dentro del plazo convenido con los clientes.

**Cuadro 7.** Resumen para las cuatro semanas en estudio.

|      | Pt (u./min.) | Variación (u./min.) | Variación (\$/sem.) | F(%)  | Variación (%) |
|------|--------------|---------------------|---------------------|-------|---------------|
| FCFS | 0,2072       | -                   | -                   | 30,67 | -             |
| EDD  | 0,2002       | -0,0070             | -82,28              | 30,46 | -0,21         |
| SPT  | 0,1991       | -0,0081             | -19,50              | 35,15 | 4,49          |
| CR   | 0,1896       | -0,0176             | -42,30              | 31,53 | 0,87          |

No obstante, aplicando esta regla el modelo obtuvo una disminución de la productividad con una implicación de pérdida de 19,50 dólares a la semana.

Implementarla no es más que ordenar los pedidos de modo acorde al grado de complejidad tecnológica de su elaboración, dándoles prioridad a aquellos que consumen menor tiempo de procesamiento en cada una de las operaciones.

## Conclusiones

El modelo de simulación desarrollado permite medir el desempeño del proceso de producción al aplicar diferentes reglas de prioridad. En el caso estudiado, ratificó la baja fiabilidad del sistema, con un promedio de 30,67%, lo cual apuntó a la necesidad de analizar los plazos de entrega que se habían venido pactando con los clientes y que no estaban ajustados a las condiciones reales del proceso de producción. Además, identificó la regla de prioridad SPT como aquella que mejor impactaría sobre el desempeño general de las operaciones. Este resultado coincide con la literatura, que considera la regla SPT como el concepto más importante en el ámbito de la secuenciación [3, 8]. De decidirse cambiar la secuenciación de los pedidos, de la regla de prioridad FCFS a la regla SPT, la fiabilidad del sistema podría mejorar en un 4,49%, consiguiéndose con la mejora uno de los objetivos estratégicos de la empresa.

## Referencias

- [1] F. Gu, J. Guo, P. Hall, and X. Gu, "An integrated architecture for implementing extended producer responsibility in the context of Industry 4.0," (in English), *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 5, pp. 14 58-1477, 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1489161.
- [2] A. de la Calle Vicente, A. Barinaga Naves, and J. C. Gietz Jiménez, "La colaboración como estrategia en la cadena de suministro: una visión metodológica," *Dyna Management*, vol. 4, no. 1, 2016, doi: 10.6036/MN7809
- [3] L. J. Krajewski, M. K. Malhotra, and L. P. Ritzman, *Operations Management Processes and Supply Chains*. Boston: Pearson Education, 2019.
- [4] S. Mittal, M. A. Khan, D. Romero, and T. Wuest, "A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)," (in English), *Journal of Manufacturing Systems*, Review vol. 49, pp. 194-214, 2018, doi: 10.1016/j.jmsy.2018.10.005.
- [5] D. A. Burbano, J. D. López, and O. A. Rojas, "Definición de un método para la programación de la producción desde el paradigma de los sistemas holónicos de manufactura", *Ingeniería y Competitividad*, vol. 17, no. 2, pp. 29-40, 2015.
- [6] J. A. A. Araúzo, J. J. de Benito Martín, R. del Olmo Martínez, and P. A. S. Angulo, "Situación actual y expectativas de los sistemas de fabricación basados en agentes", in *VIII Congreso de Ingeniería de Organización*, Leganés, 2004, pp. 1043-1052.
- [7] J. D. Romero-Rojas, V. K. Ortiz-Triana, and Á. J. Caicedo-Rolón, "La teoría de restricciones y la optimización como herramientas gerenciales para la programación de la producción. Una Aplicación en la Industria de Muebles", *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 27, pp. 74-90, 2019.
- [8] R. B. Chase and F. R. Jacobs, *Administración de operaciones: producción y cadena de suministros*. México: McGraw-Hill, 2014.
- [9] A. A. Correa Espinal, E. Rodríguez Velásquez, and M. I. Londoño Restrepo, "Secuenciación de operaciones para configuraciones de planta tipo flexible Job Shop. Estado del arte", *Avances en Sistemas e Informática*, vol. 5, no. 3, pp. 151-161, 2008.
- [10] R. Najarro, R. López, R. E. Racines, and A. Puris, "An Hybrid Genetic Algorithm to Optimization of Flow Shop Scheduling Problems under Real Environments Constraints," *Enfoque UTE*, vol. 8, no. 5, pp. 14 - 25, 12/18 2017, doi: 10.29019/enfoqueute.v8n5.176.
- [11] L. S. Dalenogare, G. B. Benitez, N. F. Ayala, and A. G. Frank, "The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance," (in English), *International Journal of Production Economics*, vol. 204, pp. 383-394, 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.019.
- [12] E. Orozco-Crespo, N. Sablón-Cossio, and R. V. Saraguro-Piarpuezán, "Discrete event simulation for resource programming: Case of Ecuadorian textile industry," in *2nd European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. IEOM 2018*, 2018, vol. 2018: IEOM Society, JUL ed., pp. 1430-1443. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85066935485&partnerID=40&md5=03b0f0748f21d8fca61fb168732a596d>
- [13] L. Ang, K. Y. Wong, and W. P. Wong, "Simulation of sequencing rules in a five-similar-machine job shop," in *16th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2011*, vol. 1, Kuala Lumpur, 2011, International Business Information Management Association, IBIMA, pp. 61-67. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905123281&partnerID=40&md5=75c-647382c1068b21538abd651438514>
- [14] J. Cano, E. Campo, and R. Gómez, "Simulación de eventos discretos en la planificación de producción para sistemas de confección modular", *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 41, no. 1, pp. 50-58, 01/01 2018.
- [15] A. Moeuf, R. Pellerin, S. Lamouri, S. Tamayo-Giraldo, and R. Barbaray, "The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0," (in English), *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 3, pp. 1118-1136, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1372647.
- [16] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, and N. F. Ayala, "Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies," (in English), *International Journal of Production Economics*, vol. 210, pp. 15-26, 2019, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.
- [17] N. Wang and O. Ghrayeb, "Dispatching Rules Application for a Parallel Machine Scheduling Problem Using Simulation," in *IIE Annual Conference. Proceedings, 2009*, Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), p. 2085.
- [18] N. Suresh Kumar and R. Sridharan, "Simulation-based metamodels for the analysis of scheduling decisions in a flexible manufacturing system operating in a tool-sharing environment," *The International Journal of*

- Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 341-355, 2010/11/01 2010, doi: 10.1007/s00170-010-2603-9.
- [19] M. Padilla, J. Guo, and R. Moraga, "An industrial application of simulation-based multi-objective scheduling," in *IIE Annual Conference and Expo 2013*, San Juan, Institute of Industrial Engineers, pp. 2457-2464. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84900320707&partnerID=40&md5=f83bafa7d872e94ce10e9b4a987f9c94>
- [20] J. A. Giraldo, C. A. Toro, and F. A. Jaramillo, "Learning about sequencing of jobs in a job shop simulation using," (in Spanish), *Formacion Universitaria*, vol. 6, no. 4, pp. 27-38, 2013, doi: 10.4067/S0718-50062013000400004.
- [21] V. Sels, N. Gheysen, and M. Vanhoucke, "A comparison of priority rules for the job shop scheduling problem under different flow time- and tardiness-related objective functions," (in English), *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 15, pp. 4255-4270, 2012, doi: 10.1080/00207543.2011.611539.
- [22] R. Tavakkoli-Moghaddam and M. Daneshmand-Mehr, "A computer simulation model for job shop scheduling problems minimizing makespan," (in English), *Computers and Industrial Engineering* [Conference Paper] vol. 48, no. 4, pp. 811-823, 2005, doi: 10.1016/j.cie.2004.12.010.
- [23] C. R. Harrell, *Simulation Using ProModel*. McGraw-Hill Education, 2011.
- [24] M. S. Casas-Ramírez, J. F. Camacho-Vallejo, and I. A. Martínez-Salazar, "Approximating solutions to a bilevel capacitated facility location problem with customer's patronization toward a list of preferences," (in English), *Applied Mathematics and Computation*, vol. 319, pp. 369-386, 2018, doi: 10.1016/j.amc.2017.03.051.
- [25] E. García Dunna, H. García Reyes, and L. E. Cárdenas Barrón, *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. Pearson Educación, 2013.
- [26] E. Orozco-Crespo, N. Sablón-Cossio, R. V. Saraguro-Piarpuezan, D. D. Hermoso-Ayala, and Y. Rodríguez-Sánchez, "Optimización de recursos mediante la simulación de eventos discretos", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 32, no. 2, pp. 146-164, 2019, doi: 10.18845/tm.v32i2.4356.
- [27] M. S. Casas-Ramírez, J. F. Camacho-Vallejo, R. G. González-Ramírez, J. A. Marmolejo-Saucedo, and J. M. Velarde-Cantú, "Optimizing a Biobjective Production-Distribution Planning Problem Using a GRASP," *Complexity*, vol. 2018, p. 3418580, 2018/02/13 2018, doi: 10.1155/2018/3418580.
- [28] E. Shokouhi, "Integrated multi-objective process planning and flexible job shop scheduling considering precedence constraints," (in English), *Production and Manufacturing Research*, vol. 6, no. 1, pp. 61-89, 2018, doi: 10.1080/21693277.2017.1415173.
- [29] D. D. Hermoso-Ayala, "Optimización del proceso de producción de medias corta logo en la fábrica Gardenia", Bachelor Thesis, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2017. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/5985>
- [30] C. J. Barniak-Velalcazar, "Optimización del proceso de abastecimiento de materia prima a las líneas de producción de la empresa Ecuajugos S.A.", Bachelor Degree, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2017. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6905>
- [31] M. Golari, N. Fan, and T. Jin, "Multistage Stochastic Optimization for Production-Inventory Planning with Intermittent Renewable Energy," (in English), *Production and Operations Management*, vol. 26, no. 3, pp. 409-425, 2017, doi: 10.1111/poms.12657.
- [32] F. Sánchez-Galván, C. L. Garay-Rondero, C. Mora-Castellanos, D. E. Gibaja-Romero, and H. Bautista-Santos, "Optimización de costos de transporte bajo el enfoque de teoría de juegos. Estudio de caso", *Nova scientia*, vol. 9, no. 19, pp. 185-210, 2017, doi: 10.21640/ns.v9i19.1051

# Biología sintética en la obtención de compuestos de interés para la industria alimentaria

## Synthetic biology as a tool used to obtain compounds of interest in the food industry

María Paula Ortuño-Fajardo<sup>1</sup>, Jose Rodolfo Chacón-Halabi<sup>2</sup>,  
María Paula Flores-Espinoza<sup>3</sup>, Roger Aguilar-Bravo<sup>4</sup>

Fecha de recepción: 15 de noviembre de 2019

Fecha de aprobación: 28 de febrero de 2020

Ortuno-Fajardo, M.P; Chacón-Halabi, J. R;  
Flores-Espinoza, M. P; Aguilar-Bravo, R. Biología sintética en la obtención de compuestos de interés para la industria alimentaria. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 69-79.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4830>

- 1 Ingeniero en Biotecnología. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Central. Costa Rica. Correo electrónico: [mapaula.ortuno@gmail.com](mailto:mapaula.ortuno@gmail.com).  
 <https://orcid.org/0000-0003-3825-4463>
- 2 Ingeniero en Biotecnología. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Central. Costa Rica. Correo electrónico: [opochacon1711@gmail.com](mailto:opochacon1711@gmail.com).  
 <https://orcid.org/0000-0002-2087-3859>
- 3 Ingeniero en Biotecnología. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Central. Costa Rica. Correo electrónico: [maria.olimpiadas92@gmail.com](mailto:maria.olimpiadas92@gmail.com).  
 <https://orcid.org/0000-0003-0478-4247>
- 4 Ingeniero en Biotecnología. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Central. Costa Rica. Correo electrónico: [raguilarbravo25@gmail.com](mailto:raguilarbravo25@gmail.com).  
 <https://orcid.org/0000-0002-6842-3937>





## Palabras clave

*Biobrick*; clonación modular; enzimas de restricción; metagenómica; biofábricas.

## Resumen

La ingeniería de rutas metabólicas, por medio de la biología sintética, se ha convertido en una herramienta de suma importancia para la industria alimentaria, debido a que se busca la optimización de procesos y obtención de compuestos ya existentes. Es posible producir compuestos que son altamente codiciados por el mercado, como enzimas que participan en procesos de fermentación o síntesis de productos de alta demanda, o saborizantes obtenidos de forma natural a partir de microorganismos modificados. Dicha edición genética se ha logrado mediante las técnicas desarrolladas en la rama de la biología sintética a lo largo de los años, como, por ejemplo, el ensamblaje de constructos genéticos y de CRISPR y ARN, mensajeros sintéticos. Estas técnicas son utilizadas para aumentar la productividad de un compuesto de interés en un microorganismo. No obstante, es necesario tomar en cuenta que no todos los microorganismos tienen las herramientas genéticas para realizar las modificaciones post-traduccionales necesarias para otorgar funcionalidad a una enzima o proteína, y que con una ruta metabólica *de novo* pueden producirse también compuestos e intermediarios tóxicos para el hospedero elegido. Particularmente, en la industria alimentaria es común la elección de microorganismos huéspedes que se consideren seguros para el consumo humano (GRAS) como las bacterias ácido-lácticas (LAB) y, más recientemente, las levaduras del género *Saccharomyces*.

## Keywords

Biobrick; modular cloning; restriction enzymes; biofactories; metagenomics.

## Abstract

The engineering of metabolic pathways through synthetic biology has become an important tool for the food industry because it seeks the optimization of processes and production of compounds of interest. It is possible to produce compounds that are highly coveted, such as enzymes that take part in fermentation processes, or synthesis of products of high demand, or flavoring produced naturally by a microorganism. This can be achieved through genetic edition developed by synthetic biology through the assembly of genetic constructs CRISPR and synthetic mRNA. These techniques are used to increase the productivity of an organism that on its own produces a compound of interest, or to genetically modify a microorganism so that it can perform the synthesis of a product. However, it is necessary to take into account that not all microorganisms have the genetic tools necessary for the required post-translational modifications to activate enzyme or protein functions, and that the insertion of *de novo* pathways may result in both toxic compounds and intermediates for the chosen host. Particularly, it is common, when working in the food industry, to choose host microorganisms safe to be consumed by human beings, like GRAS organisms such as lactic acid bacteria and, more recently, yeasts of the *Saccharomyces* genus.

## Introducción

La industria alimentaria es una de las ramas más grandes e importantes de la ciencia, debido a que se encarga de abastecer a prácticamente toda la población. Por esa razón es un campo en el que se buscan cada vez más innovaciones y métodos por medio de los cuales se puedan

optimizar los procesos de obtención de compuestos importantes [1]. Es aquí donde entran herramientas como la biología sintética y la reingeniería de rutas metabólicas, para hacer la obtención de productos más eficiente, rápida y efectiva [2]. Sin embargo, el desarrollo de estos compuestos de interés se ha complicado debido a requerimientos más estrictos con las empresas, para que sus líneas de producción sean más responsables con el ambiente y reduzcan la huella de carbon, mientras que por parte de los consumidores, se mantiene la demanda de productos con mejor sabor y más nutritivos[3]. Por razones como estas es esencial construir rutas metabólicas *de novo*, para satisfacer la necesidad de compuestos cuya producción natural es menos eficiente que si se desarrollan de manera sintética. Llega incluso a resultar más viable y económicamente beneficioso fabricar compuestos a escala industrial, una vez que el proceso se ha optimizado para la producción masiva [4].

La presente actualización del estado del arte en materia de ingeniería de rutas metabólicas tiene como objetivos la comprensión de las herramientas fundamentales utilizadas en biología sintética para la producción de compuestos recombinantes de interés, así como del papel del microbioma y la generación de rutas metabólicas *de novo* para la producción de compuestos de valor comercial, especialmente para la industria de alimentos.

## Biología sintética

La biología sintética es la rama de la biología que estudia la ingeniería o síntesis de sistemas complejos basados en mecanismos biológicos, para realizar procesos que no existen en la naturaleza, o mejorar los existentes [5]. Esta ciencia busca diseñar y construir modelos, componentes, redes y rutas biomoleculares para reprogramar microorganismos [6].

El término de ingeniería metabólica ha sido popular desde la década de los 80 y desde entonces el rango de compuestos que pueden sintetizarse se ha expandido, esto gracias a los avances que se han dado en áreas como la secuenciación de ADN, la creación de bases de datos de expresión de genes y reacciones metabólicas, y de herramientas para controlar estas rutas [7]. No obstante, no es la forma más maleable de producir debido a que hay que tomar en cuenta factores como costo y disponibilidad de sustratos, de catalización y del hospedero elegido; regulación genética y formas de maximizar la productividad del proceso y la purificación de compuestos [8]. Estos factores deben analizarse porque no todos los genes y, por ende, no todas las enzimas van a expresarse en todos los microorganismos que se tengan a disponibilidad; incluso, intermediarios que no son tóxicos para un organismo pueden serlo para otro [9]. Además, no todos los organismos poseen las mismas capacidades metabólicas para realizar modificaciones post-traduccionales esenciales para la expresión de algunas proteínas [10]. Se deben tomar en cuenta las regulaciones metabólicas propias con las que cuenta un organismo para que califique como candidato para la producción de un compuesto de interés [11].

A pesar de que existen sistemas de biología sintética para la caracterización de células y la edición genómica, generar células que producen un compuesto de interés sigue siendo un reto debido a las complejas interacciones metabólicas de regulación del metabolismo [12]. Por esta razón, se cuenta con metodologías que comprenden el diseño, la construcción y la prueba de estas rutas endógenas que se busca potenciar, o exógenas, para la generación de un compuesto ajeno al microorganismo seleccionado [12]. Dichas metodologías incluyen la obtención de bacterias rediseñadas (*designer cells*) por medio del acoplamiento de herramientas de edición genómica, síntesis química y ensamblaje de ADN.

## Historia y fundamentos de la biología sintética

Desde la década de los 80, con la aparición de nuevas técnicas de edición genética y biología molecular, como la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y las herramientas de secuenciación, se ha buscado tomar provecho de estas conexiones circuitales bioquímicas [6]. La base de la biología sintética son fragmentos de ADN codificantes, comúnmente llamados *biobricks*, para características específicas, que pueden unirse entre sí para desarrollar circuitos más complejos [13]. Al unir varios *biobricks*, estos pueden introducirse en otros organismos, modificando sus genomas para inducirlos a producir un compuesto o inhibir una ruta metabólica que disminuye la productividad de un organismo.

La biología sintética ha seguido diferentes fases de desarrollo, identificadas de acuerdo con las tecnologías descubiertas y aplicadas en cada una. La primera de estas fases se dio en la década de 1970, cuando se comenzó a editar el genoma de microorganismos para producir compuestos de interés, como la insulina a partir de *E. coli* [14]. La segunda fase vio su luz con la creación de genomas sintéticos a partir de constructos artificiales ensamblados para que un microorganismo produjera proteínas completas características de otro [15]. La tercera y actual fase se concentra en la síntesis de genomas completos y posible creación de especies nuevas [17], lo que ha causado mucha discusión, ya que se argumenta que se podría perjudicar la herencia de ciertos genes, lo que podría resultar en agentes contaminantes y dañinos para la salud humana [16]. Estos avances han hecho de la biología sintética una herramienta cada vez más versátil para la producción de compuestos o productos útiles para mejorar la calidad de vida para los seres humanos y su entorno.

Las modificaciones que se realizan sobre el metabolismo de un microorganismo deben llevarse a cabo utilizando componentes clave para la edición génica, como lo son las enzimas específicas para catalizar las reacciones necesarias para la producción de un compuesto de interés. La actividad de dichas enzimas y cómo estas podrían actuar sobre el material genético y los procesos biológicos del organismo de interés pueden ser analizados por medio de la biología sintética y la bioinformática, gracias a gran cantidad de herramientas como bases de datos, mecanismos de secuenciación de ADN y reacciones metabólicas existentes [7]. Una de las herramientas primordiales son las enzimas específicas que se encargan de activar las reacciones para manipular las rutas metabólicas objetivo, velocidad de reacción y alta eficiencia, con lo que se consiguen mejores costos de producción debido a que estas enzimas se necesitan en concentraciones menores con respecto a otras, dentro del metabolismo del microorganismo [18].

Los promotores juegan un rol de suma importancia en la biología sintética porque una gran parte del control de las rutas metabólicas biosintéticas está en la transcripción y el análisis de los transcritos, por lo que los promotores (principalmente los inducibles), al iniciar la transcripción, funcionan como reguladores genéticos muy eficaces [18].

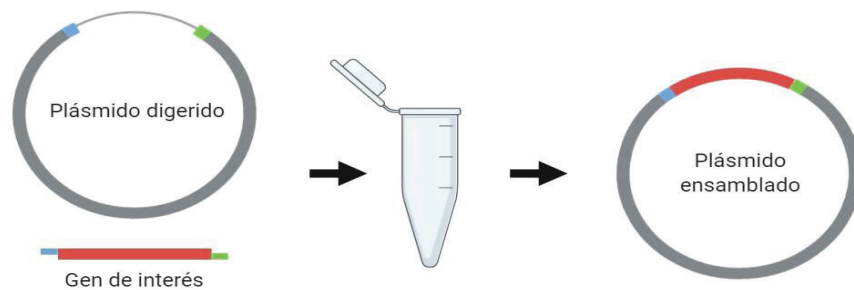
## Principales técnicas utilizadas en la biología sintética

### Ensamblaje de secuencias

En biología sintética y bioinformática, el ensamblaje de secuencias se refiere al alineamiento y mezcla de una gran cantidad de fragmentos de ADN, para la generación de secuencias de interés. Para realizar estos ensamblajes existen técnicas que permiten distintos niveles de eficiencia según sea necesario en cada proyecto.

## Golden Gate

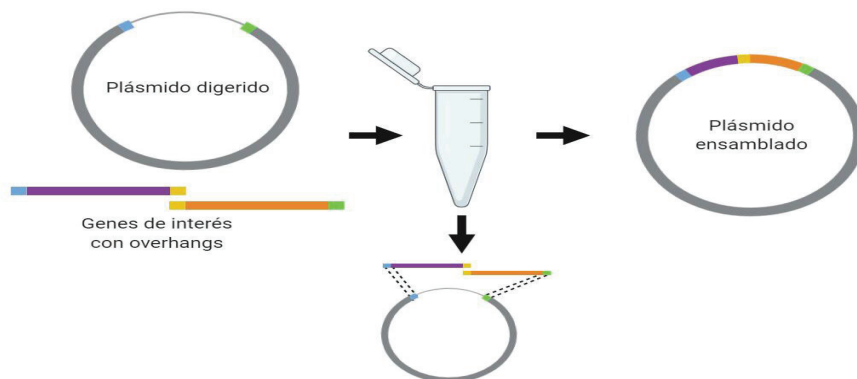
Este es un sistema que permite ensamblar múltiples fragmentos de ADN en una reacción. Se fundamenta en el uso de enzimas de restricción tipo IIS combinadas, como la BsaI con ADN ligasas, con el objetivo de ensamblar direccional y simultáneamente múltiples fragmentos de ADN (figura1). Con este método es posible obtener una alta eficiencia en la clonación porque el producto obtenido carece de un sitio de reconocimiento para las enzimas de restricción y se utiliza la incubación simple de múltiples constructos de entrada no digeridos y un vector, en presencia de enzimas de restricción y ligasas [19].



**Figura 1.** Sistema de ensamblaje Golden Gate. Para la utilización de este tipo de ensamblaje es necesaria la presencia de enzimas como BsaI y ADN ligasa. Generado por BioRender.com.

## Gibson

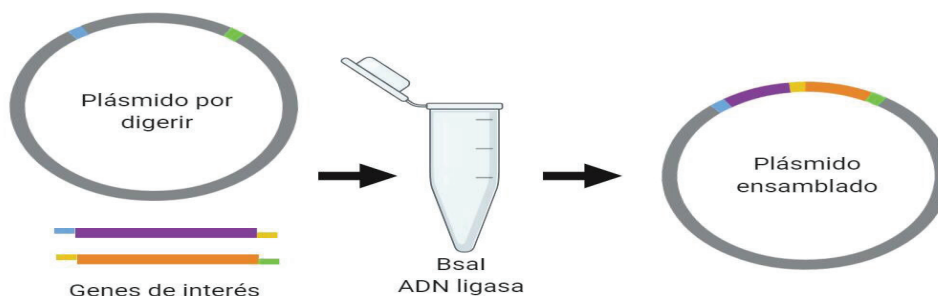
El método de ensamblaje de Gibson permite la unión de forma fácil y rápida de largos constructos de ADN (fig.2). Dicha técnica involucra el uso de tres enzimas (T4 exonucleasa, la polimerasa de fusión y la Taq ADN ligasa) que llevan a cabo la ligación entre moléculas de ADN por traslape de secuencias. Se requiere la adición de extremos en las secuencias, denominados *overhangs* [20]. Para la creación de los *overhangs*, se utilizan *primers* de PCR entre *biobricks* adyacentes, de modo que los últimos 20 nucleótidos de una secuencia coincidan con los 20 nucleótidos iniciales de la siguiente. La T4 exonucleasa permite la adición de nucleótidos en los extremos de la secuencia, mientras que la Taq ligasa los une entre ellos [21].



**Figura 2.** Sistema de ensamblaje Gibson. Este sistema emplea tres actividades enzimáticas distintas en un solo tubo de ensayo; la secuencia de fragmentos adjuntos es más larga que en el ensamblaje Golden Gate, lo cual favorece la obtención de porcentajes más altos de ensamblajes correctos. Generado por BioRender.com

### Triple A (iGem)

El ensamblaje Triple A se aplica comúnmente en la biología sintética para la clasificación de unidades funcionales básicas de material genético (promotores, sitios de unión a ribosomas, secuencias de codificación de proteínas, terminadores, etc.) como “partes” que pueden ensamblarse en “dispositivos” o “sistemas” de nivel superior para realizar tareas complejas (fig.3). Al usar este método, una parte se designa como inserto y se digiere fuera de su plásmido usando las enzimas EcoRI y SpeI o XbaI y PstI [14]; la otra parte permanece en su plásmido, pero el plásmido se abre utilizando enzimas compatibles: EcoRI y XbaI o SpeI y PstI, respectivamente. Este protocolo requiere los siguientes pasos: 1) extracción de plásmidos que contienen las dos partes a ensamblar; 2) digestión de los plásmidos para crear extremos compatibles en fragmentos de ADN; 3) separación del ADN digerido por electroforesis en gel de agarosa; 4) extracción del fragmento seleccionado del gel; 5) ligadura de los fragmentos juntos, y 6) transformación del plásmido ligado en células [22].



**Figura 3.** Sistema de ensamblaje Triple A. Por medio de herramientas bioinformáticas, se diseñan sitios de restricción en la cadena de ADN, que luego se digiere, con enzimas de restricción, para ligarse a un plásmido, utilizando ligasas;. Generado por BioRender.com

### CRISPR

Llamado así por las siglas en inglés de Agrupación de Repeticiones Palindrómicas Regularmente Intercaladas. Es una herramienta utilizada en biología sintética para modificar genes de manera específica [23]. Esta técnica toma como base el sistema inmune utilizado por bacterias, debido a que cuando estos microorganismos son atacados por bacteriófagos que les insertan su ADN o ARN, unas enzimas llamadas Cas copian ese material genético en el sistema CRISPR/Cas9, y posteriormente utilizan esta información para reconocer la secuencia del material genético del virus y poder atacarlo [24].

De esta forma, el sistema *CRISPR* permite insertar genes por recombinación homóloga, lo cual se debe a su alta complementariedad con el blanco y la especificidad al inducir un corte en las cadenas de ADN para insertar una secuencia con alta homología, por los extremos 3' y 5' del sistema [26]. Con esta técnica, también se puede inducir una Reparación Dirigida por Homología (HDR), un método usado por las células para reparar lesiones en el ADN, con baja tasa de mutagénesis; asimismo, puede ser utilizada para llevar a cabo deleciones de fragmentos en ADN de doble cadena y utilizarse para detectar y generar mutaciones específicas en animales [26] [25].

Las perspectivas que se tienen en el uso de este sistema se enfocan hacia la mayor fidelidad y la especificidad del mecanismo. También se están llevando a cabo investigaciones en genética dirigida, con la idea de alterar el genoma de especies o poblaciones completas que tienen reproducción sexual [24]. Además, es importante mencionar que algunas hipótesis señalan que debido a que las proteínas Cas9 se extraen de *S. aureus* y *S. pyogenes* (microorganismos que

pueden infectar a humanos), existe la posibilidad de que se cree resistencia a CRISPR/Cas9 en los humanos y, por tanto, se buscan alternativas de Cas de organismos que no han estado en contacto con humanos [24] [25] [27].

### ARN mensajeros sintéticos

Este es un sistema que se basa en la construcción de un ARN mensajero, que se caracteriza por tener una secuencia complementaria de un micro-ARN *target*, y que ese ARN sintetizado codifique para una proteína apoptótica [23]. Después de introducido, el ARNm sintético puede seguir dos vías: la primera es que con las células que tengan el micro-ARN complementario, habrá formación de ARN de doble cadena y será reconocido por el complejo silenciador inducido por ARN, RISC por sus siglas en inglés, y degradado por tanto se impedirá la expresión de la proteína apoptótica; la segunda vía, que se abre cuando no está presente el micro-ARN *target* en las células diana o blanco, no posibilita la formación de ARN de doble cadena y, por ende, sí se expresa la proteína apoptótica, lo cual dará como resultado que la célula se “suicide”. Por tanto, esta herramienta permite purificar células de un fenotipo de interés, en situaciones en las cuales no se cuente con un citómetro de flujo acoplado a un *cell sorter*, teniendo como ventaja que se mantiene su viabilidad [23].

### Producción de compuestos de interés en la industria alimentaria mediante rutas metabólicas de novo

Las bacterias no son los únicos microorganismos tomados en cuenta a la hora de seleccionar un microorganismo para la producción de un compuesto de interés en la industria alimentaria; se pueden usar las levaduras del género *Saccharomyces*. Entre los compuestos de mayor interés que producir están las enzimas, debido a que son beneficiosas durante el procesamiento de comidas. La manipulación de estas macromoléculas catalíticas permite la creación de productos con propiedades específicas como solubilidad, emulsión, actividad antioxidante y digestibilidad, todas características codiciadas en los alimentos [6]. A pesar de que la mayoría de levaduras no tienen la certificación GRAS, generalmente reconocida como seguridad para el consumo, *Saccharomyces cerevisiae* sí se cataloga como tal y se utiliza como chasis para producir proteínas recombinantes de manera heteróloga, como las que se mencionan a continuación [28].

La capacidad de las amilasas de digerir almidón crudo y procesado se aprovecha en la preparación de siropes con altos contenidos de glucosa, en la fermentación de bebidas y en las industrias de azúcar de todo el mundo. Las celulasas se emplean en la producción de azúcares fermentables a partir de fuentes lignificadas de células, y recientemente en la extracción y clarificación de extractos de frutas y vegetales. Otras enzimas que tienen papeles importantes en la fermentación para la producción de bebidas alcohólicas son las glucanasas, debido a que facilitan el proceso y, además, porque mejoran las cualidades visuales y olfativas de las bebidas. Las insulinasas resultan de interés debido a que descomponen moléculas para ser utilizadas como fuentes de carbono en los alimentos fructo-oligosacáridos, altamente buscados por la industria debido a que son bajos en calorías y altos en fibra [6].

Además de las enzimas mencionadas anteriormente, se pueden producir lipasas de manera sintética usando levaduras. Estas se emplean como saborizantes en productos lácteos, bebidas alcohólicas, en las industrias cárnicas, y funcionan para extender la vida útil de los alimentos. Otro grupo enzimático que puede producirse siguiendo estas vías corresponde a las proteasas, las cuales se emplean como ablandadores de carne y en la manufactura de productos lácteos como el queso [6].

El grupo de bacterias LAB es un grupo heterogéneo de bacterias gram-positivas con muchas similitudes en lo que respecta a su metabolismo, además de ser catalogadas como organismos GRAS [29]. Estas bacterias son utilizadas comúnmente en procesos de fermentación de alimentos para humanos y animales, por lo que en las últimas décadas han sido objeto de estudio en investigaciones genéticas y de reingeniería. El objetivo de estas investigaciones ha sido diseñar nuevas cepas para la producción de proteínas, enzimas y productos metabólicos de interés en la industria alimentaria [29].

La generación de mutaciones cromosómicas en microorganismos LAB se ha logrado mediante técnicas como CRISPR, tanto para silenciar genes como para reemplazar genes dentro de rutas metabólicas, siendo un requisito que no afecte a los demás genes para catalogar al microorganismo como de grado alimenticio [30]. En bacterias ácido-lácticas se logró clonar la expresión de dos genes de la fresa: una enzima alcohol acil transferasa (SAAT) y una linalool/nerolidol sintasa (FaNES), ambas involucradas en la producción de metabolitos secundarios que les dan sabor a las fresas y otras frutas como el mango [31]. Como resultado, es posible usar estos compuestos como saborizantes que son considerados naturales, altamente codiciados en el mercado, debido a que son producidos por un microorganismo vivo.

## Papel del microbioma en la industria alimentaria

Las comunidades de microbioma, que corresponden a los microorganismos presentes en el cuerpo del ser humano, pueden resultar responsables por la textura y las características organolépticas de alimentos fermentados [32]. Sin embargo, la presencia de microorganismos no deseados en uno de estos procesos industriales de producción de alimentos, puede significar una alteración en la calidad de la comida: su pudrición y seguridad de ingestión [33].

## Metagenómica y procesos de fermentación

La *metagenómica* se refiere a un área de estudio que permite la extracción y el análisis de información genómica de microbiota no cultivada, es decir, de una muestra tomada del ambiente [34]. Esto resulta ventajoso sobre los métodos genómicos regulares debido a que no hay necesidad de hacer un cultivo de los microorganismos bajo condiciones controladas en el laboratorio [34].

Esta rama tiene el potencial de proveer información relacionada con la actividad microbiana involucrada en la producción de alimentos: la metagenómica ayuda a comprender cómo se va a comportar una comunidad microbiana al ser expuesta a una nueva enzima o compuesto producido, mientras que la *metatranscriptómica* permite la identificación de los genes expresados en la producción de un alimento y el cambio de la función que cumplen estos genes con el tiempo [33]. Este ha sido el caso de varios estudios realizados en torno a las bacterias ácido-lácticas o LAB, por sus siglas en inglés, y su función con respecto a la textura y la saborización de productos lácteos como el queso; esto puede verse alterado cuando suceden cambios en la expresión de genes cuando el consumo de carbohidratos, la proteólisis y el catabolismo de aminoácidos se ven modificados para promover la producción de moléculas saborizantes [35].

## Futuro de la biología sintética en la industria alimentaria

La biología sintética adquiere cada vez más fuerza e importancia en el mundo, debido a la aplicación de las tecnologías desarrolladas. El área por trabajar en un futuro inmediato es el desarrollo de bebidas, helados, chocolates o chips que se clasifiquen como saludables, debido

a su menor contenido de grasa, carbohidratos y calorías y para satisfacer la continua demanda de la población [36].

La industria alimentaria y la generación de productos lácteos enfrentan una serie de retos para la implementación de la biología sintética en sistemas de producción de alta calidad. Las proteínas de origen sintético tienen el potencial de cambiar la generación de productos lácteos con un valor adicional benéfico para el consumidor, de forma accesible económicamente. A pesar de que es un área que atrae el interés de muchos investigadores, no es la única que tiene el potencial de otorgar a la población seguridad alimentaria [37].

Los avances en biología sintética en materia de plantas se han rezagado en comparación con los sistemas diseñados para bacterias, levaduras y mamíferos, que están revolucionando las industrias farmacéuticas y alimentarias [37]. Para poder llegar a este punto con la modificación sintética de plantas es necesario estandarizar los componentes fundamentales para la implementación de estrategias de control de la expresión genética y los procesos celulares [38]. Así, será posible comenzar a trabajar en el aumento del valor nutricional de productos agrícolas de alta demanda, construir metabolismos sintéticos para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas y reducir el uso de fertilizantes al sintetizar nuevas relaciones de simbiosis para la generación de micorrizas, entre otros [39] [40].

## Conclusión

La biología sintética tiene un enorme potencial en casi todas las áreas relacionadas con la industria alimentaria y la nutrición, y puede impactar directamente de forma positiva la vida cotidiana. Para lograrlo, es posible utilizar múltiples técnicas de ensamblaje como Golden Gate, Gibson, Triple A, y otras de modificación genética como CRISPR y ARNm sintéticos. Con estas herramientas, es posible generar rutas metabólicas *de novo* e incrementar la eficiencia de las ya existentes en un microorganismo, con la finalidad de obtener un compuesto de interés para la industria alimentaria. Las plataformas biotecnológicas, como lo son las herramientas bioinformáticas, hacen más eficiente el proceso de investigación e innovación para las distintas aplicaciones de la disciplina.

## Referencias

- [1] M. Parzanese, "Tecnologías para la industria alimentaria" *Ultrasonidos*, ficha, 19, 1-9, 2016.
- [2] D. Julleson, F. David, B. Pflieger, & J. Nielsen, "Impact of synthetic biology and metabolic engineering on industrial production of fine chemicals", *Biotechnology advances*, 33(7), 1395-1402, 2015..
- [3] M. Arevalo-Villena, A. Briones-Perez, M. R. Corbo, M. Sinigaglia & A. Bevilacqua, "Biotechnological application of yeasts in food science: Starter cultures, probiotics and enzyme production," *Journal of Applied Microbiology*, 123(6), 1360–1372, 2017. doi:10.1111/jam.13548
- [4] J. Becker & C. Wittmann, "Advanced biotechnology: Metabolically engineered cells for the bio-based production of chemicals and fuels, materials, and health-care products," *Angewandte Chemie International Edition*, 54(11), 3328-3350, 2015.
- [5] S. A. Benner & A. M. Sismour, "Synthetic biology," *Nature Reviews Genetics*, 6(7), 533–543, 2005. doi:10.1038/nrg1637
- [6] A. S. Khalil & J. J. Collins, "Synthetic biology: Applications come of age," *Nature Reviews Genetics*, 11(5), 367, 2010. doi:10.1038/nrg2775
- [7] J. D. Keasling, "Manufacturing molecules through metabolic engineering. science", *Science*, 330(6009), 1355–1358, 2010. doi:10.1126/science.1193990
- [8] M. J. Smanski, H. Zhou, J. Claesen, B. Shen, M. A. Fischbach, & C. A. Voigt, "Synthetic biology to access and expand nature's chemical diversity," *Nature Reviews Microbiology*, 14(3), 135, 2016.



- [9] Y. Guo, J. Dong, T. Zhou, J. Auxillos, T. Li, W. Zhang, ..., & J. Lin, "YeastFab: The design and construction of standard biological parts for metabolic engineering in *Saccharomyces cerevisiae*," *Nucleic Acids Research*, 43(13), e88-e88, 2015.
- [10] J. A. Jones, V. R. Vernacchio, D. M. Lachance, M. Lebovich, L. Fu, A. N. Shirke, ..., & M. A. Koffas, "ePathOptimize: A combinatorial approach for transcriptional balancing of metabolic pathways," *Scientific Reports*, 5, 11301, 2015.
- [11] P. Calero & P. I. Nikel, "Chasing bacterial chassis for metabolic engineering: A perspective review from classical to non-traditional microorganisms," *Microbial Biotechnology*, 2018. doi:10.1111/1751-7915.13292
- [12] J. Nielsen & J. D. Keasling, "Engineering cellular metabolism," *Cell*, 164(6), 1185–1197, 2016. doi:10.1016/j.cell.2016.02.004
- [13] R. P. Shetty, D. Endy, , & T. F. Knight, "Engineering BioBrick vectors from BioBrick parts," *Journal of Biological Engineering*, 2(1), 5, 2008. doi:10.1186/1754-1611-2-5
- [14] D. E. Cameron, C. J. Bashor, & J. J. Collins, "A brief history of synthetic biology," *Nature Reviews Microbiology*, 12(5), 381–390, 2014. doi:10.1038/nrmicro3239
- [15] E. Pennisi, "Synthetic genome brings new life to bacterium," *Science*, 328(5981), 958–959, 2010. doi:10.1126/science.328.5981.958
- [16] P. Marliere, "The farther, the safer: A manifesto for securely navigating synthetic species away from the old living world," *Systems and Synthetic Biology*, 3(1-4), 77–84, 2009. doi:10.1007/s11693-009-9040-9
- [17] S. F. Yuan & H. S. Alper, "Metabolic engineering of microbial cell factories for production of nutraceuticals," *Microbial Cell Factories*, 18(1), 2019. doi:10.1186/s12934-019-1096-y
- [18] J. D. Keasling, *Metabolic Engineering*, 14(3), 189–195, 2012. doi:10.1016/j.ymben.2012.01.004
- [19] S. Werner, C. Engler, E. Weber, R. Gruetzner, & S. Marillonnet, "Fast track assembly of multigene constructs using Golden Gate cloning and the MoClo system," *Bioengineered*, 3(1), 38-43, 2012. <https://doi.org/10.4161/bbug.3.1.18223>
- [20] L. Li, W. Jiang, & Y. Lu, "A modified Gibson assembly method for cloning large DNA fragments with high GC contents," *Synthetic Metabolic Pathways*, 203–209, 2018. doi:10.1007/978-1-4939-7295-1\_13
- [21] C. Engler & S. Marillonnet "Golden Gate cloning," in: "DNA Cloning and Assembly Methods," *Methods in Molecular Biology (Methods and Protocols)*, vol 1116, S. Valla and R. Lale (Eds.) . Humana Press, Totowa, NJ, 2014.
- [22] M. A. Speer & T. L. Richard, "Amplified insert assembly: An optimized approach to standard assembly of BioBrick™ genetic circuits," *Journal of Biological Engineering*, 5(1), 17, 2011. doi:10.1186/1754-1611-5-17
- [23] C. Giménez, L. Curti, & F. Pereyra, "Dos herramientas de la biología sintética," *Revista Hospital Italiano*, Buenos Aires, 36(3), 124-128, sept. de 2016.
- [24] M. Adli, "The CRISPR tool kit for genome editing and beyond," *Nature Communications*, 9(1), 2018. doi:10.1038/s41467-018-04252-2.
- [25] C. T. Charlesworth *et al.* "Identification of pre-existing adaptive immunity to Cas9 proteins in humans," *BioArxiv*, 2018. doi.org/10.1101/243345.
- [26] M. Lammoglia, R. Lozano, C. García, C. Avilez, V. Trejo, R. Muñoz, & C. López, "La revolución en ingeniería genética: Sistema CRISPR/Cas," *Investigación en Discapacidad*, 5(2), 116-128, agosto de 2016.
- [27] A. M. Moreno. *et al.*, "Exploring protein orthogonality in immune space: A case study with AAV and Cas9 orthologs." Preprint at <https://www.biorxiv.org/content/early/2018/01/10/245985>.
- [28] K.J. Verstrepen, P.J. Chambers, I.S. Pretorius, A. Querol, & G.H. Fleet, *The yeast handbook*. Heidelberg: Springer, 2006.
- [29] C. Peterbauer, T. Maischberger, & D. Haltrich, "Food-grade gene expression in lactic acid bacteria," *Biotechnology Journal*, 6(9), 1147–1161, 2011. doi:10.1002/biot.201100034
- [30] I. Hernandez, D. Molenaar, J. Beekwilder, H. Bouwmeester, & J. E. T. van Hylckama Vlieg, "Expression of plant flavor genes in *Lactococcus lactis*," *Applied and Environmental Microbiology*, 73(5), 1544–1552, 2007. doi:10.1128/aem.01870-06
- [31] I. Hernández, D. Molenaar, J. Beekwilder, H. Bouwmeester, & J. E. van Hylckama Vlieg, "Expression of plant flavor genes in *Lactococcus lactis*," *Applied and Environmental Microbiology*, 73(5), 1544-1552, 2007.
- [32] P. Amon & I. Sanderson, "What is the microbiome?," *Archives of Disease in Childhood. Education & Practice Edition*, 102(5), 257–260, 2017. doi:10.1136/archdischild-2016-311643

- [33] F. De Filippis, E. Parente, & D. Ercolini, "Recent past, present, and future of the food microbiome," *Annual Review of Food Science and Technology*, 9(1), 589–608, 2018. doi:10.1146/annurev-food-030117-012312
- [34] S. Boddu & K. Divakar, "Metagenomics insight into environmental microbiome and their application in Food/ Pharmaceutical Industry," *Microbial Biotechnology, vol. 2. Application in Food and Pharmacology*, 2018. ISBN: 978-981-10-7139-3, 978-981-10-7140-9
- [35] E. Dugat-Bony, C. Straub, A. Teissandier, D. Onésime, V. Loux, C. Monnet *et al.*, "Overview of a Surface-Ripened Cheese Community Functioning by Meta-Omics Analyses," *PLoS ONE* 10(4), e0124360, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124360>
- [36] A. Tyagi, A. Kumar, S. V. Aparna, R. H. Mallappa, S. Grover, & V. K. Batish, "Synthetic biology: Applications in the food sector," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(11), 1777–1789, 2014. doi:10.1080/10408398.2013.782534
- [37] C. Engler, M. Youles, R. Gruetzner, T. M. Ehnert, S. Werner, J. D. Jones, ..., & S. Marillonnet, "A golden gate modular cloning toolbox for plants," *ACS Synthetic Biology*, 3(11), 839-843, 2014.
- [38] K. Müller, D. Siegel, F. R. Jahnke, K. Gerrer, S. Wend, E. L. Decker, ..., & M. D. Zurbriggen, "A red light-controlled synthetic gene expression switch for plant systems," *Molecular BioSystems*, 10(7), 1679-1688, 2014.
- [39] C. Rogers, & G. E. Oldroyd, "Synthetic biology approaches to engineering the nitrogen symbiosis in cereals," *Journal of Experimental Botany*, 65(8), 1939-1946, 2014.
- [40] M.S. Roell, & M. D. Zurbriggen, "The impact of synthetic biology for future agriculture and nutrition," *Current Opinion in Biotechnology*, 61, 102–109, 2020. doi:10.1016/j.copbio.2019.10.004

# Diseño de un plan estratégico de investigación y extensión para la Escuela de Computación del TEC

## Design of a research and extension strategic plan for the School of Computing at TEC

César Garita-Rodríguez<sup>1</sup>, Mauricio Arroyo-Herrera<sup>2</sup>,  
Manuel González-Espinoza<sup>3</sup>

---


*Fecha de recepción: 3 de marzo de 2020*

*Fecha de aprobación: 18 de noviembre de 2019*


Garita-Rodríguez, C; Arroyo-Herrera, M; González-Espinoza, M. Diseño de un plan estratégico de investigación y extensión para la Escuela de Computación del TEC. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 80-91.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4732>


1 Doctor en Ciencias de la Computación. Escuela de Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: [cesar@itcr.ac.cr](mailto:cesar@itcr.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0003-4592-3266>

2 Ingeniero en Computación. Escuela de Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: [marroyo@tec.ac.cr](mailto:marroyo@tec.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0001-6632-4831>

3 Economista. Oficina de Planificación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: [mangonzalez@tec.ac.cr](mailto:mangonzalez@tec.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0003-3595-9134>



## Palabras clave

Plan estratégico; investigación; extensión; computación; universidad.

## Resumen

Actualmente las carreras de Computación en la Educación Superior enfrentan retos importantes relacionados con el ejercicio de la investigación y la extensión, como parte de las actividades sustantivas de toda universidad para responder a las necesidades sociales. Estos retos incluyen, por ejemplo, el desarrollo de competencias del recurso humano, la atracción de fondos y la creación de redes de colaboración internacionales. Para responder a ellos, es fundamental para las escuelas o unidades académicas contar con un plan estratégico de investigación y extensión, que contenga las principales metas, actividades e indicadores, para un periodo establecido. En este artículo se describe en detalle la metodología aplicada exitosamente por la Escuela de Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica en el diseño de un plan estratégico quinquenal de investigación y extensión de forma eficaz y con resultados concretos. Esta metodología permitió trabajar en el diseño de manera democrática y acorde con el órgano consultivo, mediante la organización de un conjunto de etapas y actividades definidas, y puede resultar útil como referencia para otras escuelas de computación en Latinoamérica.

## Keywords

Strategic planning; research; extension; university; computing school.

## Abstract

Nowadays, computing programs in higher education face important challenges related to research and extension exercise, as part of the substantive activities of every university, including for example: the development of competencies by its employees, fundraising, and the creation of international collaborative networks. In order to respond to these challenges, it is essential for the schools or the academic divisions to have a strategic research and extension plan that contains the main goals, activities, and indicators to be fulfilled within a given period. This article describes in detail the methodology successfully applied by the Computing School of the Costa Rican Institute of Technology (TEC), in the design of a five-year strategic plan for research and extension, in a relatively short time. This methodology involved participatory and purposeful work, through well-defined stages and activities; it could be useful to take it as reference for other computer schools in Latin America.

## Introducción

La Escuela de Ingeniería en Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) fue creada en 1976 originalmente con el “propósito de formar profesionales con capacidades y habilidades para administrar la función de los sistemas de información en las empresas y desarrollar sistemas de información administrativos” [1]. En la actualidad, la Escuela tiene la misión de contribuir a la sociedad costarricense en la generación de conocimiento científico-tecnológico en computación por medio de la docencia, la investigación, la extensión y la vinculación externa, con base en principios de excelencia académica, pertinencia social, regionalización, equidad y formación integral [2].

La Escuela ofrece el plan de estudios de Ingeniería en Computación en los cinco campus o sedes del TEC y en total atiende a una población de alrededor de 1500 estudiantes. Además,

junto con otras escuelas participa en la ejecución de otros programas académicos de grado como Ingeniería en Computadores y Administración de Tecnologías de Información.

En cuanto a programas de posgrado, desde 1986 la Escuela imparte la Maestría en Computación, que actualmente ofrece dos opciones: Ciencias de la Computación y Gerencia de Tecnologías de Información [3]. En la última década, la Escuela ha participado en la ejecución de programas de maestría y doctorado junto con otras Escuelas, a saber: la Maestría en Gerencia de Proyectos, el Doctorado Interuniversitario en Ciencias Naturales para el Desarrollo y el Doctorado en Ingeniería.

Además, cuenta con un Centro de Investigaciones en Computación creado en 1992, que tiene como propósito contribuir a la solución de problemas mediante la generación, adaptación, incorporación y difusión de conocimientos informáticos. En particular, esta unidad debe promover en forma determinada la investigación y la extensión por parte de la Escuela.

Para realizar las labores derivadas de la ejecución de sus planes de estudio, investigación y extensión, la Escuela cuenta con alrededor de sesenta profesores a tiempo completo y unos treinta a tiempo parcial.

A partir del 2010, la Escuela decidió someterse a procesos continuos de autoevaluación y acreditación por medio del SINAES (Sistema Nacional de Acreditación de la Educación Superior). Es así que a la fecha se han acreditado los programas de Ingeniería en Computación y de la Maestría en Computación. Este proceso ha implicado necesariamente el establecimiento de compromisos de mejora que deben ser verificados ante el ente acreditador, el cual realiza inspecciones cada cuatro años a partir de informes de cumplimiento bianuales.

En este contexto de autoevaluación y acreditación de la calidad, y como resultado de la autoevaluación de la carrera de Ingeniería en Computación y de los programas de Maestría en Computación, se estableció que como parte de la mejora del proceso educativo y propiamente en lo referente a investigación se debía desarrollar un plan estratégico de investigación y extensión. Los principales aspectos que mejorar identificados en estas autoevaluaciones fueron la participación de un reducido grupo de docentes en investigación, la percepción por un porcentaje significativo de los docentes de que la carrera no presentaba oportunidades para realizar investigación y que no había grupos de investigación formalmente constituidos dentro de los programas. Por otro lado, con respecto a la extensión, los hallazgos incluyeron la ausencia de un plan estratégico específico y el hecho de no contarse con un registro de los resultados de las acciones de extensión.

En el plano institucional de mejoramiento de la calidad, el TEC se destacó en el 2017 como la primera universidad del continente americano que logró obtener la acreditación institucional otorgada por Francia por medio de HCERES (Alto Consejo de Evaluación de la Investigación y la Educación Superior de Francia) [4]. El informe institucional derivado de esta acreditación indicó algunas debilidades en la temática de investigación, a saber: la falta de cultura de investigación en la institución, un rendimiento débil en términos de número de publicaciones en revistas internacionales, la dispersión estructural de entidades de investigación y a proporción relativamente pequeña de miembros del personal académico con grado de doctorado.

En este contexto, teniendo presentes los compromisos de los procesos de acreditación y el planteamiento estratégico, la Escuela de Computación ha venido direccionando sus esfuerzos al desarrollo del plan estratégico de investigación y extensión (PEIE), con el propósito de coadyuvar a la producción científica y social. Al mismo tiempo, estos esfuerzos han sido relevantes para mantener la acreditación de los programas de la Escuela ante el SINAES y contribuir a resolver las carencias indicadas en el proceso de acreditación institucional ante HCERES.

Además, cabe mencionar que se ha procurado alinear el PEIE con el Plan Estratégico General de la Escuela, establecido para el periodo 2017- 2022. En particular, el plan general incluye un eje de investigación, extensión y acción social, con líneas estratégicas que han sido consideradas dentro de la estructuración del PEIE. El plan general fue diseñado con éxito siguiendo una metodología muy similar a la que se describe en este trabajo.

El presente artículo describe la metodología y el resultado del proceso de diseño del PEIE para la Escuela de Computación. El proceso seguido se considera valioso en vista de que el resultado se alcanzó en un corto tiempo y con resultados muy satisfactorios. Se puede adelantar que el trabajo en talleres fue un medio importante para extraer y sintetizar la información relevante en la construcción del plan.

### Trabajos relacionados

En América Latina, la planificación estratégica como forma de orientar la vida universitaria ha significado para las universidades a lo largo de su historia grandes retos en procura de adaptarse a entornos en constante evolución. Las comunidades universitarias han articulado importantes esfuerzos colectivos para enfrentar los cambios que la sociedad demanda. Berheim señala que “la preocupación de las universidades latinoamericanas por extender su acción más allá de los linderos académicos arranca de la Reforma de Córdoba de 1918” [5].

En este mundo altamente integrado, se requiere capacidad para gestionar los cambios internos que las comunidades universitarias requieren. Por esta razón, aplicar metodologías de planificación estratégica en la gestión del quehacer universitario y en particular, en investigación y extensión toma gran importancia, pues en áreas altamente especializadas como la computación, la complejidad de los desarrollos tecnológicos genera rápidas transformaciones.

Trabajos relacionados, como el de Davara [6], demuestran que las herramientas de planificación estratégica efectivamente deben actualizarse y funcionar en un mundo en extremo complejo y cambiante; sin embargo, indican que principalmente deberá tenerse en cuenta a las personas que participan en el proceso, dado que de sus conocimientos, habilidades, fuentes de datos e interrelaciones dependerá el alcanzar con éxito las metas del plan. Pulgarin y Rivera [7] así como Martelo *et al.* [8] agregan que hoy existe una gran cantidad de herramientas para apoyar las formas de realizar planificación estratégica, que permite a las organizaciones orientar su toma de decisiones .

En este contexto, el TEC ha llevado a cabo múltiples procesos de planificación estratégica desde un enfoque de mejora continua, incluyendo el Plan Estratégico Institucional 2017 – 2021, así como diferentes microprocesos de planificación (desarrollados en diferentes unidades académicas), que responden tanto a objetivos de acreditación como a actividades de gerencia interna para la gestión administrativa cotidiana de las unidades. Estas experiencias han permitido el crecimiento de las ventajas comparativas de la Institución con respecto a otras universidades, que a su vez le han valido la acreditación internacional por parte de HCERES, como se mencionó en la sección anterior.

En el caso particular del proceso de construcción del PEIE en el área de Investigación de la Escuela de Ingeniería en Computación, se trabajó bajo un enfoque multicriterio para la toma de decisiones utilizando diferentes herramientas de la planificación estratégica: análisis FODA, técnicas de priorización, análisis MECA, técnicas de categorización, análisis de brechas y análisis gráfico [9]; la Oficina de Planificación (OPI), del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), brindó el acompañamiento necesario para ello.

Gracias a los profesionales expertos en planificación, fue posible desarrollar el PEIE en la Escuela, pues “la conducción de un ejercicio de planificación estratégica no se puede aprender en los

libros” [10]. Justamente, la forma de trabajo articulado y participativo entre colaboradores de la OPI y profesores de la Escuela probó ser uno de los aspectos innovadores de la metodología aplicada y responde a la tendencia global de encontrar modelos participativos y dinámicos acordes a las necesidades particularidades de las instituciones de Educación Superior.

En ciertos casos, se aplicaron también técnicas computacionales relacionadas con cursos de “Arquitectura de la Información” y “Calidad del Software” para apoyar en la resolución de problemas específicos, como se explicará en la sección “Definición de líneas estratégicas”.

Otro rasgo característico de la metodología implementada es que se basa en la concepción de la planificación estratégica “como una hoja de ruta que orientará el camino y el devenir de una organización a largo plazo, diseñada por medio de la búsqueda del equilibrio entre la misión y la visión, el qué y el para qué, las fortalezas y debilidades deducidas del entorno interno y las amenazas y oportunidades del externo” [6]. El proceso de planificación estratégica siguió un avance gradual, de lo general hacia lo específico, hasta construir los insumos que han permitido a la organización tomar decisiones en el área de interés. En este proceso, se partió de una visualización del estado actual de la investigación y la extensión; se planteó el futuro deseable y se definieron los objetivos y las estrategias para lograrlos, de forma colaborativa. Esto resultó ventajoso, pues permitió el empoderamiento de la comunidad y su participación en el proceso, construyendo las metas sobre la idiosincrasia y formas de trabajo propias del área profesional específica.

En resumen, la metodología aplicada en este trabajo constituye una base de referencia para sistematizar de forma cada vez más robusta los procesos de planificación estratégica en las universidades e instituciones dirigidas a promover la ciencia y la tecnología, y en particular, a fortalecer su vínculo con la sociedad latinoamericana por medio de la investigación y la extensión.

## Metodología general

Como se explicó anteriormente, la Escuela de Computación acordó diseñar un plan estratégico de investigación y extensión mediante la aplicación formal de una metodología ágil y participativa. Se nombró una comisión integrada por miembros del Consejo de Escuela para coordinar las tareas por realizar para el diseño del plan. En diferentes etapas de su desarrollo, también participaron otros miembros de la Escuela, incluidos los coordinadores de unidades, y representantes de investigadores docentes de diferentes sedes. A lo largo del proceso, se contó con el apoyo fundamental de la Oficina de Planificación del TEC mediante su asesoría técnica y logística.

Antes de definir las etapas específicas del diseño, se definió el objetivo general del plan y se llevó a cabo un análisis previo de documentos institucionales y de la Escuela que podían servir como insumos al plan. A continuación, se describen el objetivo general, el análisis del contexto y las fases en el desarrollo de la metodología.

### Objetivo general

Para el Plan Estratégico de Investigación, Extensión y Acción Social 2019-2023 se estableció el siguiente objetivo general:

“Diseñar un modelo de organización orientada a la investigación, la extensión, la acción social y la vinculación de la Escuela, conforme a principios de excelencia, pertinencia y regionalización”.

## Análisis del contexto

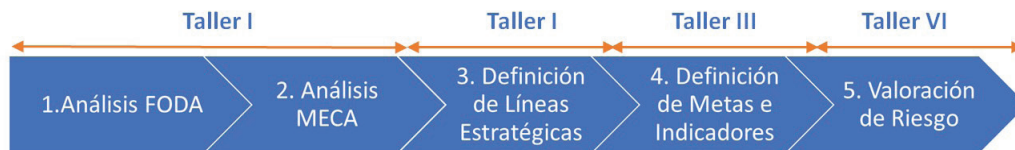
Como parte de un análisis de contexto para el desarrollo del Plan Estratégico de Investigación y Extensión (PEIE) para la Escuela de Computación, se llevó a cabo una revisión de documentos que representaban insumos importantes para su diseño. Entre otros, los siguientes documentos fueron estudiados para ese propósito:

- Plan Estratégico (PE) de la Escuela de Computación 2017-2022 y Plan Estratégico del TEC 2017-2021.
- Compromiso de mejoras para la acreditación de los programas de Bachillerato y Maestría en Computación.
- Lineamientos internos para investigación y extensión en el TEC.
- Informe de Acreditación Institucional con el Alto Consejo de Evaluación de la Investigación y la Educación Superior, de Francia (HCERES).
- Ejes de Conocimiento Estratégicos y Modelo Académico del TEC.

El resultado del análisis de contexto se resumió en un documento que fue distribuido entre los participantes del diseño del plan.

## Talleres y fases de la metodología

Para el desarrollo del PEIE, se estableció trabajar en una metodología desarrollada por etapas mediante talleres de trabajo colaborativo, según la figura 1.



**Figura 1.** Metodología propuesta para diseñar el plan.

Como puede observarse en la figura, para la ejecución de las etapas se organizaron cuatro talleres de trabajo en los que participaron diferentes representantes de la Escuela (invitados según la naturaleza de cada etapa). En total, participaron alrededor de treinta personas durante todo el proceso.

Antes de cada etapa también se realizaron actividades de planeamiento, organización, procesamiento de información, realización de informes y ajustes con base en retroalimentación recibida por parte de los participantes.

El desarrollo de los talleres y las etapas se describe en detalle en las siguientes secciones:

### *Taller I – FODA Y MECA*

Como primer taller se realizó un diagnóstico relacionado con los procesos de investigación y extensión en la Escuela, utilizando la herramienta FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas), y luego, un análisis MECA en el que se identificaron acciones para mejorar las fortalezas (M), explotar las oportunidades (E), contrarrestar las debilidades © y afrontar las amenazas (A). En este taller participaron cerca de veinticinco personas como representantes de los programas y sedes involucrados. Las actividades y productos de estos análisis se describen a continuación.



### Análisis FODA

La realización del FODA comprendió las siguientes actividades:

- Conformación de grupos de trabajo: Se formaron aleatoriamente cuatro grupos de trabajo. A cada grupo se le asignó una letra del FODA.
- Lluvia de ideas por cada letra del FODA: Cada grupo realizó una lluvia de ideas sobre las variables más importantes relacionadas con la inicial de la palabra correspondiente, respecto a temas de investigación, extensión y acción social, en la Escuela.
- Integración de variables internas y externas: Se reunieron los grupos de acuerdo con el tipo de las variables que les fueron asignadas: las internas (fortalezas, debilidades) y las externas (oportunidades, amenazas), las discutieron y seleccionaron las diez más relevantes por cada letra. Cada grupo anotó las variables seleccionadas en una cartulina y la colocó en la pared de la sala de reunión.
- Priorización del FODA: Por medio de votación con puntos [11], todos los participantes votaron individualmente para seleccionar las tres ideas de mayor relevancia (con 3 como el puntaje más alto; 2, el segundo en importancia, y 1, el menor) por cada variable anotada. Para esto, a cada participante se le dieron tres papeles adhesivos, uno por cada puntaje, por cada cartulina, con el propósito de que asignara los puntajes según su valoración.
- Consolidación del FODA: Finalmente, se escogieron las cinco variables de cada letra con los puntajes más altos.

El producto de esta etapa fueron listas de enunciados relacionados con fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas identificadas y priorizados de manera grupal por los participantes. En la figura 2 se incluye un ejemplo de los factores identificados por cada dimensión del análisis FODA.



**Figura 2.** Análisis FODA.

### Análisis MECA

La realización del MECA comprendió las siguientes actividades:

- Análisis MECA: Se mantuvieron los cuatro grupos anteriores y se detallaron las acciones que indica el MECA, para cada una de las variables del FODA, a modo de respuestas a las preguntas ¿cómo mejorar las fortalezas?, ¿cómo explotar las oportunidades?, ¿cómo contrarrestar las debilidades?, ¿cómo afrontar las amenazas? Cada grupo escribió en una cartulina las acciones que consideró más importantes en relación con cada variable del FODA.
- Validación del análisis: Cada grupo expuso las acciones propuestas para llevar a cabo el MECA. Se discutieron en pleno con base en cada presentación y se realizaron ajustes de forma consensuada.

Como resultado del MECA se obtuvieron listas de acciones identificadas por cada letra MECA correspondiente a cada letra FODA. En la figura 3. , se incluye un ejemplo de los factores MECA correspondientes a los factores FODA antes señalados.



**Figura 3.** Factores MECA.

### *Taller II – Definición de Líneas Estratégicas*

Con base en los análisis FODA y MECA, en el segundo taller se propusieron líneas estratégicas para agrupar las acciones identificadas en el MECA. El producto de esta fase fue una lista de líneas estratégicas de investigación y extensión.

Para lograr el objetivo de este taller, se modeló el problema de identificar las líneas estratégicas como un problema de ordenamiento de tarjetas abierto (*open card sorting* [12]). Para ello, cada acción de las listas obtenidas del análisis MECA se escribió en una tarjeta. Las tarjetas fueron distribuidas entre los participantes del taller para que las agruparan y asignaran un nombre a cada grupo. Los grupos se convirtieron en líneas estratégicas. Es decir, las líneas estratégicas se visualizan como agrupamientos conceptuales de las acciones identificadas en el MECA.

Además de identificar las líneas estratégicas, se hizo un ejercicio de valoración por parte de los participantes, para contrastar el nivel de madurez actual y el nivel de madurez deseado para cada línea. Esta valoración puede usarse como insumo para luego calendarizar las acciones específicas del plan.

En resumen, las actividades realizadas en este taller fueron las siguientes:

- Repaso de resultados de MECA: Se realizó una exposición en la que se resumieron las actividades y resultados de la fase anterior.
- Conformación de grupos de trabajo: Se dividieron los participantes en cuatro grupos de trabajo (uno por cada letra MECA), de forma aleatoria.
- Definición de líneas estratégicas: Cada grupo identificó las líneas estratégicas correspondientes, haciendo un ejercicio de agrupamiento de tarjetas (acciones MECA). Para ello, se facilitó a cada grupo un juego completo de las tarjetas de todas las acciones MECA y se les solicitó que definieran alrededor de 7 grupos (categorías que agruparan las tarjetas) y le dieran un nombre a cada grupo.
- Exposición de resultados por grupo: Cada grupo presentó los resultados de la identificación de líneas. Para este propósito, los grupos anotaron los nombres de las líneas en hojas respectivas, y en cada hoja pegaron las tarjetas correspondientes. Las hojas fueron pegadas a su vez en rotafolios que se colocaron alrededor del espacio de trabajo para facilitar la exposición e incentivar la validación por los participantes.
- Unificación de resultados: Para conjuntar los resultados, se nombró una mesa de unificación con un representante de cada grupo para llegar a un consenso respecto a la definición final de las líneas estratégicas.

- Valoración de madurez de líneas estratégicas: Una vez identificadas y unificadas las líneas estratégicas, los participantes valoraron el nivel de madurez actual y el nivel de madurez deseado para cada línea. En este caso, se utilizó como referencia el modelo de madurez CMMI (Capability Maturity Model Integration [13]) y cada participante valoró de 1 a 5 el nivel de madurez de cada línea (1: Inicial; 2: Administrado; 3: Definido; 4: Administrado cuantitativamente; 5: Optimizado). Con base en la valoración, se calculó el promedio de madurez del estado actual y del estado deseado para cada línea estratégica.

Como producto de este taller, se identificaron las líneas estratégicas del plan, que se ilustran en la figura 4.



**Figura 4.** Líneas estratégicas del Plan.

### *Taller III – Definición de Metas e Indicadores*

El taller III tuvo como objetivo principal definir las metas e indicadores del plan. Para ello se contó con una plantilla (hoja de cálculo estructurada) sugerida por los asesores de la OPI para la elaboración detallada de las metas e indicadores, con base en ejes, líneas y acciones del plan. Además, como trabajo previo al taller se realizó una propuesta para vincular las líneas estratégicas resultantes de la fase anterior en función de las líneas del Plan Estratégico de la Escuela (aquí denominadas “ejes”). Es decir, las líneas del PEIE fueron incorporadas dentro de las líneas del Plan Estratégico de la Escuela como marco superior.

El tercer taller consistió en completar de forma colaborativa y participativa la plantilla facilitada por la OPI para la definición de las metas e indicadores.

En particular, las actividades llevadas a cabo fueron las siguientes:

- Repaso de los resultados de identificación de líneas estratégicas: Se realizó una exposición en la que se resumieron las actividades y resultados de la fase anterior.

Presentación de la metodología: Se expuso la metodología que seguir en este taller con apoyo en la plantilla para la elaboración de metas e indicadores proporcionada por la OPI. Se presentaron sugerencias sobre cómo definir las metas y los indicadores.

- Conformación de grupos de trabajo: Se dividieron los participantes en dos grupos de trabajo, a cada uno de los cuales se les asignaron tres líneas estratégicas.

- Definición de indicadores y metas: Cada grupo llenó de manera colaborativa la plantilla proporcionada para la definición de las metas e indicadores, con base en las líneas correspondientes.
- Exposición de resultados por grupo: Cada grupo presentó las definiciones de metas e indicadores; estas se analizaron y discutieron. Se realizaron ajustes según la valoración de los participantes.

Los resultados quedaron escritos en las plantillas; cada una incluyó la siguiente información, referente a una acción MECA:

- Eje del Plan Estratégico de la Escuela
- Línea estratégica
- Acción MECA
- Metas
- Actividades
- Indicadores
- Responsables
- Plazos
- Requerimientos

En el cuadro 1 se presentan, como ejemplo, las metas, actividades e indicadores correspondientes a la acción “Identificar grupos potenciales y desarrollar hoja de ruta”.

**Cuadro 1.** Ejemplo de metas e indicadores.

| Metas  | Actividades  | Indicadores   |
|--|--|---|
| Promover al menos seis grupos de investigación y extensión formales, con criterios de calidad. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elaborar un mecanismo para identificar grupos de investigación con base en criterios de calidad.</li> <li>- Elaborar hoja de ruta para consolidar cada grupo.</li> <li>- Promover a los grupos identificados según hoja de ruta.</li> </ul> | Al menos seis grupos de investigación consolidados según criterios de calidad, incluyendo al menos un grupo por unidad académica. |

#### *Taller IV – Valoración del Riesgo*

En esta última etapa se realizó una identificación y valoración de riesgos que podían obstaculizar el cumplimiento de las metas establecidas en el plan. El producto de esta etapa fue un conjunto de riesgos y su valoración en función de las metas establecidas. Las actividades realizadas en este taller final se resumen a continuación:

1. Repaso de resultados de la identificación de metas e indicadores: Se realizó una exposición en la que se resumieron las actividades y resultados de la fase anterior.
2. Presentación de metodología: Se expuso la metodología por seguir en este taller con apoyo en la plantilla para valoración del riesgo institucional proporcionada por la OPI. Se presentaron el contexto y los conceptos fundamentales asociados con la valoración del riesgo institucional. Se dieron sugerencias sobre cómo llenar la plantilla, para lo cual se les facilitó a los participantes un catálogo de riesgos institucionales que habían sido previamente identificados por la OPI en diferentes proyectos institucionales, para que

fuesen tomados como referencia. Se les recomendó proponer como base un riesgo que el grupo considerara como el principal para cada meta.

3. Conformación de grupos de trabajo: Se dividieron los participantes en dos grupos de trabajo. Se estableció que cada grupo valoraría las metas previamente establecidas para tres líneas estratégicas. Cada grupo llenó de manera colaborativa las plantillas proporcionadas para las metas correspondientes.
4. Exposición de resultados por grupo: Cada grupo presentó los resultados de la valoración del riesgo para las metas respectivas. Se analizaron y discutieron los resultados. Se realizaron ajustes según la valoración de los participantes.

Como resultado de esta etapa, se obtuvo una plantilla con esta información por cada meta del plan:

- Identificación del riesgo (evento de riesgo)
- Calificación del riesgo (probabilidad, impacto)
- Evaluación del control (posible forma de control)
- Acciones para mitigar el riesgo

A continuación, en el cuadro 2 se presenta un ejemplo de la valoración de riesgo para una meta particular.

**Cuadro 2.** Ejemplo de valoración del riesgo.

| Meta  | Evento   | Calificación | Acciones de mitigación                                 |
|---|--|--------------|--|
| Promover al menos seis grupos de investigación y extensión formales con criterios de calidad. | Falta de consenso en la definición de los criterios para identificar a los grupos. | Muy alto     | Hacer conciencia del por qué y para qué de los grupos. |

## Conclusiones y trabajo futuro

Como principal conclusión a la realización del diseño del PEIE siguiendo la metodología presentada en este artículo se tiene el contar actualmente con el Plan de Investigación y Extensión para los próximos cinco años, como una propuesta que incluye los siguientes elementos principales:

- Definición de líneas estratégicas
- Especificación de acciones MECA con base en análisis FODA
- Metas bien definidas
- Actividades para alcanzar las metas
- Indicadores para medir el logro de las metas
- Definición de los responsables de las metas
- Plazos para la realización de las actividades
- Valoración de los riesgos asociados a las metas y acciones para contrarrestarlos.

La metodología seguida permitió la realización de las actividades de forma democrática, participativa y guiada, con actores de toda la Escuela; todo ello de una manera ágil y en corto tiempo.

Además de técnicas formales de planificación estratégica, se aplicaron y adaptaron también técnicas o modelos computacionales derivados de temas programáticos de los cursos de la Escuela, tales como ordenamiento de tarjetas y el modelo de madurez CMMI (ver sección V).

La asesoría y apoyo técnico brindado por la Oficina de Planificación fue fundamental para poder realizar esta propuesta de plan. De hecho, con base en la experiencia y los resultados obtenidos, se recomienda tomar como base la metodología de planificación utilizada, para la realización de futuras actividades similares en la Escuela.

La propuesta de plan ya fue sometida a consideración del Consejo de Escuela para conseguir su aprobación oficial. Como trabajo futuro, una vez aprobada, sería conveniente elaborar un *mapa de ruta* con base en los productos del plan, que facilite la gestión eficaz de las actividades y las metas propuestas para los próximos años.

Finalmente, la metodología utilizada puede ser útil como referencia para otras escuelas de computación en América Latina, que de manera similar necesiten desarrollar procesos de planeación estratégica relacionados con investigación y extensión, o bien con otras actividades académicas o administrativas.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los miembros de la Escuela de Computación que participaron en los talleres de trabajo, así como a los compañeros de la Oficina de Planificación que dieron su asesoría y seguimiento durante todo el proceso de diseño del plan estratégico presentado en este artículo.

## Referencias

- [1] TEC, “Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC)”, <https://www.tec.ac.cr/>, 2019.
- [2] TEC, “Escuela de Ingeniería en Computación”, <https://www.tec.ac.cr/escuelas/escuela-ingenieria-computacion>, 2019.
- [3] TEC, “Programa de Maestría en Computación”, <https://www.tec.ac.cr/programas-academicos/maestria-computacion>, 2019.
- [4] TEC, “TEC, primera universidad latinoamericana acreditada por Consejo Francés de Evaluación HCERES”, <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/>, 2017.
- [5] C. T. Berheim, “El nuevo concepto de extensión universitaria y difusión cultural y su relación con las políticas de desarrollo cultural en América Latina”, en *Anuario de Estudios Centroamericanos*, pp. 93-126, 1978.
- [6] F. Davara, “Planificación estratégica e inteligencia económica: herramientas de gestión del cambio”, *Cuadernos de Estrategia*, vol. 174, pp. 189-229, 2015.
- [7] S. Pulgarin y H. Rivera, “Las herramientas estratégicas: un apoyo al proceso de toma de decisiones gerenciales (Strategic tools: Supporting the managerial decision making process)”, *Criterio Libre*, vol. 10, pp. 89-114, 2012.
- [8] R. Martelo, A. Ponce y F. Acuña, “Guía metodológica para el diseño de un plan estratégico informático en instituciones de Educación Superior”, *Formación Universitaria*, vol. 9, 2016.
- [9] Ž. Živković, D. Nikolić, M. Savić, P. Djordjević, and I. Mihajlović, “Prioritizing strategic goals in Higher Education organizations by using a SWOT–PROMETHEE/GAIA–GDSS model”, *Group Decision and Negotiation*, vol. 26, pp. 829-846, 2017.
- [10] F. J. García-Peñalvo, “Dirección Estratégica”, <https://repositorio.grial.eu/handle/grial/1168>, 2018.
- [11] J. Dalton, “Dot voting”, in *Great Big Agile: An OS for agile leaders* [formato electrónico]. Apress, 2019.
- [12] P. Morville, L. Rosenfeld, and J. Arango, *Information architecture: For the Web and beyond*, 4th ed. [formato electrónico]. O’Reilly Media, 2015.
- [13] C. Institute, “CMMI Institute”, <https://cmminstitute.com/>, 2019.

# Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla

Natural and anthropogenic sources of atmospheric pollution: State of the art of its impact on the physicochemical properties of rain water and fog water

José Carlos Mora-Barrantes<sup>1</sup>, José Pablo Sibaja- Brenes<sup>2</sup>,  
Henry Borbón- Alpizar<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 25 de octubre de 2019*  
*Fecha de aprobación: 7 de marzo de 2020*

Mora-Barrantes, J. C; Sibaja- Brenes, J. P;  
Borbón- Alpizar, H. Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 92-103.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4806>

- 1 Escuela de Química. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: [jose.mora.barrantes@una.cr](mailto:jose.mora.barrantes@una.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>
- 2 Escuela de Química. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: [jose.sibaja.brenes@una.cr](mailto:jose.sibaja.brenes@una.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>
- 3 Escuela de Química. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: [henry.borbon.alpizar@una.cr](mailto:henry.borbon.alpizar@una.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0003-0869-4126>



## Palabras claves

Costa Rica; agua de lluvia; agua de niebla; contaminantes; atmosfera; fuentes naturales y antropogénicas.

## Resumen

En este artículo se describe el estado del arte en relación con la influencia de las fuentes naturales y antropogénicas de los contaminantes atmosféricos en las características fisicoquímicas del agua de niebla y de lluvia en zonas boscosas. Se recopilaron resultados de investigaciones que se considera facilitarán a la comunidad científica la generación de proyectos en zonas boscosas montañosas. Se determinó que la mayor parte de estudios se han enfocado en el impacto de las emisiones gaseosas de fuentes antropogénicas de zonas urbanas en las características del agua de lluvia. Existen también otras investigaciones sobre la afectación del agua de niebla y de lluvia de zonas boscosas; estas igualmente indican que existe una importante relación de la calidad del agua de niebla y de lluvia de los bosques con las emisiones gaseosas antropogénicas, principalmente. En el caso particular de Costa Rica se han realizado dos pesquisas preliminares respecto al tema. La revisión del estado del arte sugiere un mayor control y seguimiento de los parámetros fisicoquímicos del agua (lluvia y niebla), con mayores tiempos de muestreo y análisis, y la identificación de las fuentes naturales y humanas de los contaminantes en las cercanías de las áreas de estudio.

## Keywords

Costa Rica; water; rain; fog; pollutants; atmosphere; natural and anthropogenic sources.

## Abstract

In this article, a description is presented on the state of the art related with the influence of natural and anthropogenic atmospheric pollutant sources on the physical and chemical properties of the rain water and fog water. It was determined that most of the researches done have been located on urban areas and have evaluated the impact of the anthropogenic emissions to the atmosphere on water quality. There have been a limited quantity of investigations in forest zones. The few ones point out an important influence of human pollutant emissions on the properties of rain water and fog water. In the particular case of Costa Rica, two preliminar researches have been done. The literature review on the state of the art suggested the need for longer research periods in sampling and analyzing rainwater and fog water, in order to do a better control of their physicochemical parameters. Future researches shall study deeply the natural and anthropogenic sources of atmospheric pollutants in the surroundings of the areas of study.

## Introducción

El cambio climático es uno de los principales problemas que afectan a la humanidad, producto de sus efectos medioambientales y, fundamentalmente, debido a su principal acción determinante, como lo es el incremento de los gases de efecto invernadero, resultantes principalmente de las actividades antropogénicas. El clima, de forma general, es el resultado de la interacción de la radiación solar, la órbita terrestre, la latitud, la composición atmosférica (temperatura, presión, vientos, precipitaciones), las corrientes oceánicas, el efecto albedo y, sobre todo, los efectos antropogénicos. La aceleración del cambio climático en tiempos recientes ha sido fuertemente influenciada por las actividades humanas, como producto del consumo de combustibles fósiles, resultado en exponencial incremento de gases de efecto invernadero como dióxidos de



azufre, ozono, metano, dióxido de carbono y dióxido de nitrógeno, entre otros. El aumento de la temperatura global generada por el efecto invernadero es responsable del incremento del nivel del mar, de la disminución de las capas de nieve y hielo, además de la modificación en el estado natural de las precipitaciones. Todo esto impacta los sistemas naturales relacionados al hielo, a los sistemas hidrológicos y a la calidad de las aguas, a los sistemas biológicos marinos y de agua dulce y a la productividad agrícola y forestal.

Producto de lo anterior, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el realizar una revisión del estado del arte de la influencia de fuentes naturales y antropogénicas en la composición fisicoquímica de la calidad agua de lluvia y de niebla. El alcance del proyecto contempla el análisis del agua de lluvia y niebla principalmente en zonas montañosas. Se pretende que la investigación desarrollada sirva como insumo para la sensibilización de la población y en determinación preliminar de potenciales fuentes naturales y antropogénicas de contaminación en el agua de lluvia y niebla. Se revisaron diferentes artículos de investigación de bases de datos de editoriales relacionados con cambio climático, principalmente vinculadas al tema de contaminación atmosférica y su impacto sobre el recurso hídrico.

## La atmósfera

La atmósfera es la envoltura gaseosa que rodea totalmente la Tierra; esta se puede dividir en capas concéntricas perfectamente diferenciadas respecto a su composición y densidad. En los 30 km más próximos a la superficie terrestre está concentrada aproximadamente el 99% de su composición. Las capas que componen la atmósfera son la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la ionosfera y la exosfera. De estas capas, la troposfera es la de mayor cercanía a la superficie de la tierra y en la que se produce el tiempo atmosférico. La composición de la troposfera es de 78,00% de nitrógeno, 21,00% de oxígeno, 0,90% de argón, 0,03% de anhídrido acético y agua en cantidades que varían constantemente (vapor, gotas y cristales de hielo) [1]-[3]. La cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera se conoce como humedad atmosférica. Esta ocupa un pequeño volumen, el cual es menor al 2% del vapor de agua total, no obstante, la humedad atmosférica es el componente más importante desde el punto de vista climático. La entrada de vapor de agua en el aire atmosférico se realiza mediante los procesos de evaporación de aguas superficiales y del agua de los suelos, así como producto de la transpiración de las plantas. La salida del vapor de agua se lleva a cabo por medio de las precipitaciones líquidas y sólidas. El rocío y la escarcha son dos maneras de condensación del exceso de vapor de agua, sobrepasado el punto de saturación; este exceso es depositado en forma de gotas de agua sobre los objetos fríos produciendo el rocío, la niebla y cristales de hielo comúnmente conocidos como escarcha [1]-[3].

La condensación del vapor de agua se produce de forma habitual sobre partículas de polvo, sales, entre otras, llamadas núcleos de condensación. Estas partículas son higroscópicas y favorecen la condensación, inclusive previamente a la saturación. A las partículas que originan núcleos de cristales de hielo se les conoce como núcleos de sublimación. En el caso particular de la condensación, este fenómeno se puede generar por cualquier proceso atmosférico que produzca enfriamiento, como el ascenso de una masa de aire, la mezcla de masas de aire con diferentes temperaturas y el contacto con superficies más frías. Todos estos procesos generan enfriamiento de la masa de aire, causando la disminución de su punto de saturación y la condensación del vapor de agua sobre los núcleos de condensación[1]-[3].

Al enfriarse la masa de aire se generan los procesos de condensación o congelación, los cuales dan lugar a la aparición de gotas de agua o de pequeños cristales de hielo, los cuales irán creciendo y una vez que almacenen el tamaño suficiente, caerán, dando lugar a la precipitación.

Se puede hacer referencia a precipitaciones líquidas o sólidas. Las sólidas son la nieve y el granizo. Las líquidas son la llovizna, el chubasco y la lluvia [1]-[3].

En la atmósfera, existe gran cantidad de partículas sobre las cuales las moléculas de vapor de agua tienden a congregarse para transformarse en líquido, generando de esta forma, diminutas gotas de agua. La mayor parte de estas partículas de condensación están compuestas por sustancias químicas como sulfatos y nitratos, producidos en el aire como resultado de la combustión de productos abundantes en azufre y ácido nítrico encontrados de forma permanente en la atmósfera [1]-[3].

### Contaminantes atmosféricos

La concentración de contaminantes en la atmósfera es muy variable; depende de la distribución y ubicación de las fuentes de contaminación, la altura de chimeneas, las condiciones topográficas y, en particular, las cambiantes condiciones climáticas [4]. Entre las principales fuentes de contaminación antropogénica del aire están las plantas de calefacción, las centrales térmicas, las incineradoras de residuos, la industria química, el transporte, la minería a cielo abierto y la generación de energía nuclear [5]-[6]. Su acción dañina ha sido de tal dimensión, que el aumento en el nivel de contaminación del aire en las ciudades ha llegado a afectar las zonas aledañas, incluyendo ecosistemas boscosos. Estudios sobre la exposición a contaminantes atmosféricos además han revelado que los contaminantes en ambientes exteriores e interiores están asociados con efectos adversos agudos en la salud de humanos y con el deterioro de los ecosistemas terrestres (flora y fauna) [6].

La contaminación antropogénica del aire se incorpora principalmente a los elementos del agua de lluvia en la capa debajo de las nubes. En este sentido, la precipitación es un elemento importante para la autolimpieza del aire. Investigaciones han demostrado que después de la lluvia, o incluso durante esta, el aire contiene significativamente menos contaminantes que antes de la precipitación [4]. El contacto del agua de lluvia con los contaminantes atmosféricos genera, entre otros efectos, el fenómeno llamado lluvia ácida, el cual ha sido altamente identificado por la afectación de la calidad del agua, como producto de la presencia de aniones de ácido sulfúrico ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y de ácido nítrico ( $\text{NO}_3^{-}$ ), principalmente [4]-[7]. Por lo tanto, la acidificación implica la presencia de sulfatos y nitratos, los cuales se forman por oxidación de los dióxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y dióxidos nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) presentes en las emisiones gaseosas, provenientes principalmente de fuentes antropogénicas. Se estima que las fuentes antropogénicas aportan más del 50% de las emisiones de  $\text{SO}_2$  y más del 30% de las emisiones de  $\text{NO}_x$  [4], [8].

Por su parte, la deposición atmosférica del nitrógeno desempeña un rol importante en el ciclo del nitrógeno. Un aumento en la carga del nitrógeno atmosférico puede generar una saturación de nitrógeno en los ecosistemas. En centros urbanos la principal fuente antropogénica de compuestos nitrogenados en la precipitación es la quema de combustibles fósiles [4]-[9].

Otro compuesto químico que se debe considerar porque también se relaciona con la contaminación atmosférica es el fósforo, presente en forma de fosfatos en aguas naturales. Uno de los principales problemas ambientales es producto de su aporte al proceso de eutrofización. Las cantidades medias de este elemento en aguas residuales alcanzan valores entre los 9,15  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y los 30  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [4]-[10].

### Agua de lluvia y de niebla

De acuerdo a la definición oficial de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la lluvia es la precipitación de partículas líquidas de agua de diámetro mayor a 0,5 mm o de gotas inferiores dispersas, las cuales precipitan a una velocidad entre 3 y 4 m/s en función de su peso

y de la influencia del viento. Las gotas son dispersas y dependen de la presión atmosférica, la temperatura y humedad [1]-[3]-[11].

Los principales fenómenos atmosféricos visibles del tiempo meteorológico son las nubes, la lluvia y la niebla, los cuales representan un paso transitorio e indispensable en el ciclo del agua como la evaporación de la humedad desde la superficie terrestre, su transporte hasta niveles superiores de la atmósfera, la condensación del vapor de agua en masas nubosas y el retorno final de agua a la tierra en forma de precipitaciones de lluvia y niebla, entre otros [1]-[3]-[11].

El agua de lluvia y el agua de niebla cumplen un rol fundamental en la limpieza de la atmósfera, proceso mediante el cual se remueve la mayor cantidad de contaminantes. La composición química del agua de lluvia y de niebla presenta variación de un lugar a otro y de una región respecto a otra, como producto de la influencia de fuentes locales [12]-[13], tanto naturales como antropogénicas [12]-[14]. Por lo tanto, determinar la composición del agua (tanto de lluvia como de niebla) es una variable atmosférica que permite comprender el papel del transporte de los componentes solubles de la atmósfera y la contribución de las diferentes fuentes de contaminantes atmosféricos sobre la calidad del agua [12]-[15]. Los fenómenos de agua de lluvia y de niebla funcionan como un sumidero relevante para la materia en forma de gases y partículas, incluyendo metales trazas en la atmósfera, y por lo tanto, desempeñan un rol importante en el control de las concentraciones de estas especies [12]-[16].

Además de la lluvia, es bien sabido que la niebla y las nubes impactan también la composición atmosférica y química del aire. Tanto la niebla como las nubes pueden incorporar gases y especies articuladas en la atmósfera, pudiendo transformar estas especies en otras a través de la fase acuosa o mediante reacciones heterogéneas [4]. Estas nuevas especies formadas pueden afectar la producción agrícola, ya que debilitan las características del suelo, producto de su acumulación y generan procesos como la acidificación, la alcalinización y la metalización, causando una reducción de sedimentos que afecta la flora y fauna [4].

Las emisiones gaseosas pueden incorporarse a los elementos del agua de lluvia y de niebla en la capa debajo de las nubes, haciendo esto que, la precipitación sea un elemento importante en la autolimpieza del aire. La presencia de contaminantes en el agua de la lluvia y de niebla ha incrementado en tiempos recientes. Si bien tanto la lluvia como la niebla son un fenómeno de destilación natural, su formación involucra inicialmente un proceso de nucleación en partículas de aerosol. Cuando el agua se condensa, interactúa con diversas sustancias del aire, por lo tanto, disuelve parte de estas. A medida que el agua de lluvia desciende, arrastra mayor cantidad de impurezas [15]. En efecto, las primeras aguas de lluvia pueden estar mayormente contaminadas; esta condición disminuye a medida que continúa la lluvia, hasta que el agua baja limpia [15]-[17]. Este proceso global permite limpiar el aire también; es así que, después del proceso de lluvia, el contenido de aerosol (amonio, nitrato y sulfato) se reduce entre el 30% y el 73%, mientras que el de gases (amonio, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y cloruro) puede disminuir entre el 24% y el 63%. La habilidad que tiene el agua de lluvia y de niebla en la captura de contaminantes del aire hace de ella un buen medio para el estudio de la contaminación atmosférica [15].

### **Impacto ambiental de los contaminantes atmosféricos presentes en el agua de lluvia y de niebla**

El agua de lluvia y de niebla tiene una influencia importante en los sistemas naturales y en la salud humana. En el caso particular del agua de niebla, sus propiedades han sido estudiadas durante mucho tiempo por la comunidad científica mundial [18]-[21]. La deposición de agua de niebla es importante para las regiones forestales, tanto para el crecimiento de la vegetación

como para mantener el balance hídrico. Además, sistemas de colección de agua de niebla se han utilizado para solventar la escasez de agua, como ha ocurrido en regiones de Sur África [18]-[22]-[23]. No obstante, en días de niebla, esta se carga con sustancias orgánicas y gotas de entre  $2 \mu\text{m}$  y  $8 \mu\text{m}$  que pueden ser dañinas para la salud si se inhalan [24]-[25]. Otras investigaciones han estudiado la relación entre la composición iónica del agua de niebla y las condiciones marinas, siendo uno de los principales hallazgos que la contribución o influencia de las condiciones marinas es generalmente poca e, inclusive, insignificante en la composición fisicoquímica de la niebla continental [26].

Varios investigadores señalan que los principales iones inorgánicos presentes en la niebla, incluyendo los iones sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^{-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^{+}$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y ion magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), son producidos por contaminación antropogénica como la producción industrial, las emisiones de automóviles y la construcción de edificios, entre otras formas [24]-[27]-[28]. Varias pesquisas han demostrado la existencia de una relación directa entre la dinámica microfísica y la química del agua de niebla [29]-[32]. Por su parte, otras investigaciones han demostrado que concentraciones de iones en agua de niebla formada en las laderas de las montañas muestran una relación de dependencia con la concentración atmosférica y las propiedades de la niebla [33].

Diferentes estudios han evidenciado la influencia de los contaminantes atmosféricos sobre el agua de niebla y de lluvia. La concentración de iones en agua de niebla y de lluvia es mayor en áreas rurales [25]-[34] que en áreas costeras [35]. Los nutrientes y contaminantes presentes en la niebla y en el agua de las nubes ejercen una fuerte influencia sobre los ecosistemas [36], especialmente en ecosistemas forestales montañosos, en los cuales la niebla es muy frecuente; por lo tanto, se infiere que el agua de niebla es una fuente importante de deposición de iones [37]-[38].

Un estudio realizado en Loja, Ecuador, en la cordillera oriental de Los Andes respecto a la composición química del agua de niebla y de la lluvia, indicó en el caso particular de las muestras de agua, que los iones predominantes son sulfato e hidrógeno, y además que los iones nitrato y amonio desempeñan un papel menor. La investigación resaltó que existe una diferencia pronunciada entre la composición del agua de lluvia y del agua de niebla. La concentración equivalente de ion total de las muestras de niebla y de lluvia es de  $139 \mu\text{eq L}^{-1}$  y  $1534,4 \mu\text{eq L}^{-1}$ , respectivamente. La apreciable diferencia se debe a los iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4^{+}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^{-}$ ) presentes en el agua de niebla [35].

Los iones  $\text{H}^+$ ,  $\text{NH}_4^{+}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  son indicadores de contaminación antropogénica. Para el caso particular de los compuestos de nitrógeno presentes en el agua de niebla, se ha encontrado que sus principales fuentes son la quema de biomasa, la industria y el tráfico vehicular. No obstante, se deben considerar muchos otros aspectos [35]-[39].

Las diferencias químicas entre la niebla y el agua de lluvia pueden variar en función del tamaño de las gotitas. Las gotas de lluvia son mucho más grandes que las gotas de niebla y pueden formar soluciones más diluidas que las gotas de niebla. Otra diferencia entre la niebla y el agua de lluvia es el desequilibrio iónico en la niebla, ya que en esta predomina la presencia de los cationes sobre los aniones. Este excedente de cationes puede resultar de la presencia de ácidos orgánicos [35]-[39].

En el caso particular del agua de lluvia, D.Gillete *et al.* [40] y N. Rastogi *et al.* [41] indican que esta es un mecanismo muy efectivo para absorber y remover partículas de aerosoles presentes en la atmósfera, gracias a los procesos de arrastre “en la nube” y por “debajo de la nube”. También D.Gillete *et al.* [40], Rastogi *et al.* [41] y Niu *et al.* [42]. indican que las características del suelo de una determinada región tienen una alta influencia e impacto sobre el pH y la composición química del agua de lluvia.

Yao W *et al.* [43] realizaron una investigación durante el 2016 para determinar la composición química del agua de lluvia en tres sitios rurales de la provincia de Hebei, en el norte de China. El propósito principal del estudio fue obtener una comprensión inicial de la química del agua de lluvia, así como identificar las posibles fuentes que contribuyen en su composición y finalmente, explorar la influencia de fuentes terrestres sobre la composición iónica en zonas no urbanas del norte de China. Entre los resultados están: a) que existe una limitada concentración de aniones en el agua de lluvia (según Migliavacca *et al.* [44] y Xu *et al.* [45], esto se debe a la poca presencia de  $\text{HCO}_3^-$  y de ácidos orgánicos en el agua de lluvia); b) que el catión calcio fue en el estudio el de mayor abundancia, seguido por el ion amonio, c) que los aniones predominantes son el sulfato y el nitrato (estos datos coinciden con otros estudios realizados por Xu & Han [45], Huang *et al.* [46] y Larssen *et al.* [47]) y d) que se detectaron además altas concentraciones del ion  $\text{F}^-$ . Según lo indican Larssen *et al.* [47], las concentraciones de  $\text{F}^-$  se pueden deber a la combustión del carbón con alto contenido de fluoruros.

Particularmente en sistemas montañosos y costeros, La Bastille and Pool [48] y los autores Liu *et al.* [49] indican que la deposición de agua de niebla y de nube sobre la vegetación es una vía de absorción de químicos y de agua contaminantes atmosféricos cerca de la superficie terrestre [50]. Un gran número de estudios han mostrado una alta concentración de moléculas orgánicas e inorgánicas en el agua de niebla [50]-[52].

### **Afectación de las zonas boscosas por los contaminantes atmosféricos**

La entrada de sustancias químicas provenientes de la niebla y de las nubes en los ecosistemas boscosos es suficientemente significativa como para causar un impacto negativo en el crecimiento del bosque [50]-[53]-[54]. No obstante, la mayoría de las investigaciones sobre el agua de lluvia como fuente de deposición química han sido mayormente desarrollada en áreas con alta frecuencia de nubosidad, en las cuales se espera que reciban masas de aire contaminadas, particularmente en regiones templadas como Norte América y Europa [50]-[55]-[58].

Una investigación de Wen *et al.* [50] realizada en el año 2005 cuantificó y reportó la concentración iónica en agua de niebla de un bosque tropical. El estudio indicó valores altos de pH tanto en el agua de niebla como agua de lluvia; estos datos se pueden atribuir a las altas concentraciones de iones amonio, calcio y magnesio, comparadas con las bajas concentraciones de sulfatos y nitratos [50]. En general, el ion amonio es mayormente atribuido a la producción bacteriana derivada de actividades de agricultura, y se estima que este ion neutraliza la acidez del agua de la nube [58]. En el estudio, Wen *et al.* [50] reportaron el ion  $\text{HCO}_3^-$  como el de mayor concentración. Estudios previos habían reportado también el ion  $\text{HCO}_3^-$  como uno de los iones de mayor importancia en nieblas tropicales [59], [60]. El estudio de Wen *et al.* [50] indica una mayor concentración de iones en el agua de niebla respecto al agua de lluvia. Lo cual coincide de igual manera con otros estudios previos [61].

En Costa Rica se llevó a cabo un estudio preliminar para determinar la composición química del agua de lluvia y de niebla en tres sitios de la Reserva Biológica "Monteverde", en Puntarenas, durante el periodo comprendido entre octubre del 2009 y enero del 2010. Para el agua de lluvia la cantidad de muestras recolectadas fueron diez y para el agua de niebla cinco. El estudio indicó concentraciones bajas de hidronio ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) tanto en el agua de lluvia como de niebla; estas concentraciones se pueden atribuir a una importante presencia de sales de calcio, en comparación con las bajas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Se concluye además que las concentraciones reportadas de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en las muestras de agua de lluvia y de niebla se debieron a la influencia del ecosistema marino cercano [62].

Otro estudio preliminar desarrollado en Costa Rica (Parque Nacional “Volcán Poás”) durante los meses de mayo a octubre del 2017 por el Laboratorio de Química de la Atmósfera, de la Universidad Nacional, analizó en el agua de lluvia parámetros como pH, conductividad eléctrica y aniones ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$ ). Los valores más significativos fueron encontrados cerca del punto denominado *foco emisor* o el mirador para visitantes fueron  $pH = 2,50$ ;  $15,48 \pm 0,22$  mg/L para  $F^-$ ;  $205,2 \pm 3,3$  mg/L para  $Cl^-$ , y  $64,0 \pm 1,4$  mg/L para el  $SO_4^{2-}$  [63].

Vásquez *et al.* [62] y Bolaños *et al.* [63] recomiendan el monitoreo constante del agua de lluvia y de niebla, con el fin de contar con mayores datos sobre la influencia de fuentes de contaminación naturales y antropogénicas en ecosistemas naturales costarricenses. Estos autores indican la necesidad de analizar una mayor cantidad de muestras y, por lo tanto, de contaminantes (aniones y cationes), así como de realizar más extensos periodos de muestreo y análisis (mínimo dos años).

Vásquez *et al.* [62] y Bolaños *et al.* [63] indican que un mayor control y seguimiento de la composición fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla es fundamental para el establecimiento de relaciones entre estas (lluvia y niebla) y las emisiones antropogénicas y naturales, así como para verificar la influencia de los contaminantes atmosféricos en los patrones de lluvia y sus efectos en el agua de consumo humano y la flora y la fauna de los ecosistemas naturales.

## Conclusiones

La lluvia y el agua de niebla cumplen un rol fundamental en la limpieza de la atmósfera, debido a que mediante este proceso se remueve la mayor cantidad de contaminantes. La composición química del agua de lluvia y de niebla varía de un lugar a otro, esto como producto de la influencia de fuentes locales de emisiones tanto naturales como antropogénicas.

La contaminación antropogénica del aire se incorpora principalmente a los elementos del agua de lluvia en la capa debajo de la nube, por lo que la precipitación es un elemento importante en la autolimpieza del aire. Algunas investigaciones han demostrado que después de la lluvia o incluso durante esta, el aire contiene significativamente menos contaminantes previos a la precipitación.

La mayoría de las investigaciones en el mundo se han enfocado en el impacto ocasionado por las fuentes antropogénicas de contaminantes atmosféricos generados en zonas urbanas sobre las propiedades fisicoquímicas del agua de lluvia.

Las investigaciones sobre la influencia de contaminantes atmosféricos sobre la composición iónica del agua de lluvia y de niebla de zonas boscosas ha sido limitada; no obstante, ha aumentado en los últimos años. Los principales estudios se han realizado en zonas montañosas relativamente cercanas a áreas urbanas.

Pesquisas desarrolladas en bosques naturales han determinado que los iones  $H^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$  son indicadores de los efectos nocivos de la contaminación antropogénica, producto de la quema de biomasa, la industria y el tráfico vehicular.

En el caso particular de Costa Rica se han realizado dos pesquisas preliminares respecto al tema, una de estas, en la Reserva Biológica “Monteverde” y otra en el Parque Nacional “Volcán Poás”. Para el primer estudio se evidenciaron concentraciones bajas de  $H_3O^+$  tanto en el agua de lluvia como en la de niebla. En el Volcán Poas los valores más significativos de concentración de iones hidronio y aniones fueron encontrados cerca del foco emisor o mirador para .

Se recomienda un mayor control y seguimiento de los parámetros fisicoquímicos del agua de lluvia y de niebla, con mayores tiempos de muestreo y análisis, además de la identificación de

las fuentes naturales y humanas de emisión de contaminantes atmosféricos en las cercanías de las áreas de estudio, en este caso particular, los bosques naturales montañosos.

Se recomienda además el desarrollo de proyectos de investigación en los bosques que contemplen de forma más integral los siguientes aspectos: a) el estudio de la variación fisicoquímica de la calidad del aire, b) el análisis de la variación fisicoquímica del agua de niebla y de lluvia, d) la determinación del impacto ambiental en las reservas de bosques o parques nacionales producto de las emisiones atmosféricas de fuentes naturales y antropogénicas mediante el uso del modelo de dispersión de contaminantes y e) el desarrollo de procesos de capacitación y sensibilización con la población local y los trabajadores sobre los peligros, riesgos y medidas de prevención asociados con la variabilidad de la calidad del aire y del agua en los sitios de estudio.

## Referencias

- [1] M. Andrades y C. Múñez, "Fundamentos de climatología", en *Material Didáctico: Agricultura y Alimentación, Universidad de la Rioja. Servicio de Publicaciones*. 2012 [En línea]. Disponible en: [https://archive.org/stream/2013FundamentosDeClimatologia/2013\\_fundamentos-de-climatologia\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/2013FundamentosDeClimatologia/2013_fundamentos-de-climatologia_djvu.txt). [Accesado: 22 de jul, 2019]
- [2] J. Barrio, B. Anton, y D. Andrés, *Física y química*, 3.ª ed.. Madrid: Editorial Editex, 2008.
- [3] L. Ayala, "Determinación de las concentraciones de iones presentes en el agua de lluvia de la zona urbana de la ciudad de Cuenca, causantes de lluvia ácida", tesis doctoral, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2014.
- [4] J. Pokrývková, L. Lackóová, J. Fuska, L. Tátošová, and A. Policht-Latawiec, "The impact of air pollution on rainwater quality," *Rocznik Ochrona Srodowiska*, vol. 18, no. 1, pp. 303-231, 2016.
- [5] A. Sanmi, "Effect of air pollution on rain water: A case study of Ado-Ekiti, Nigeria. International," *Journal of Advanced Engineering Research and Science (IAERS)*, vol. 5, no. 8, pp. 19-24, 2018. doi: [10.22161/ijaers.5.8.3](https://doi.org/10.22161/ijaers.5.8.3)
- [6] A. Mishra, K.A. Singh, P. Pandey, S. Yadav, A.H. Khan, and S.C. Barman, "Urban air pollution and their effects on rain water characteristics in Lucknow City," *India Journal of Environmental Research and Development*, vol. 6, no. 4, pp. 1127-1132, 2012.
- [7] S.A. Iqbal, and Y. Mido, *Chemistry of Air and Air Pollution*. New Delhi: Discovery Publishing House, 2010.
- [8] G. Schwedt, *The essential guide to environmental chemistry*. New York, USA: John Wiley and Sons, 2001.
- [9] P. Brimblecombe, H. Hara, D. Houle, and M. Novak, *Acid Rain – Deposition to Recovery*. Dordrech, Netherland: Springer, 2007.
- [10] M. Radojević, and V.N. Bashkin, *Practical Environmental Analysis*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2006.
- [11] Organización Meteorológica Mundial, "Atlas de Nubes", London: Organización Mundial de la Salud, 1987.
- [12] A. Doria, "Metales pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombia", *Revista Colombiana de Química*, vol. 46, no. 2, pp. 37-44, 2017.
- [13] J. Seinfeld, and S. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change*. USA: Wiley – Interscience, 2006.
- [14] E. Ramirez, R. Miranda, Y. Garcia, I. Balderas, H. Bravo, R. Sosa, P. Sánchez, A. Alarcon, A, M. Torres, and J. Kahl, "Chemical composition of rainwater in northeastern México," *Atmósfera*, vol. 23, no. 3, pp. 213-224, 2010.
- [15] L. Khemani, T. Momin, M. Naik, R. Prakasa, R. Kumar, and M. Ramana, M, "Impact of alkaline particulates on pH of rainwater in India," *Water Air Soil Pollution*, vol. 25, no. 4, pp 365–376, 1985.
- [16] C. Samara, R. Tsiouridou, and Ch. Balafoutis, "Chemical composition of rain in Thessaloniki, Greece, in relation to meteorological conditions," *Atmospheric Environment. Part B, Urban Atmosphere*, vol. 26, no. 3, pp. 359-367, 1992. doi: [10.1016/0957-1272\(92\)90011-G](https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90011-G)
- [17] M. Romeo, and D. Nenita, "Rainwater chemistry and biochemical effects: Basis for air quality assessment of Cagayan de Oro city, Philippines," *Mindanao Journal of Science and Technology*, vol. 9, pp. 29-72, 2011.

- [18] Y. Yanyu, N. Shengj, Z. Lijuan, Z. Yu, and X. Feng, "The influences of macro- and microphysical characteristics of sea-fog on fog-water chemical composition," *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 624–636, 2014. doi: [10.1007/s00376-013-3059-2](https://doi.org/10.1007/s00376-013-3059-2)
- [19] S. Fuzzi, J. Castillo, E. Jiusto, and G. Lala, "Chemical composition of radiation fog water at Albany, New York, and its relationship to fog microphysics", *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, no. D5, pp. 7159–7164, 1984. doi: [10.1029/JD089iD05p07159](https://doi.org/10.1029/JD089iD05p07159)
- [20] S.X. Fan, H.L. Huang, K.H. Gu, H.S. Li, B. Zhu, H.L. Zhang, and Y. Fan, "Effect of Fog Process on the Size Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmospheric Aerosol PM10. *Gaodeng Xuexiao Huaxue Xuebao / Chemical Journal of Chinese Universities*, vol. 31, no. 12, pp. 2375–2382, 2010. [On line]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/283957537\\_Effect\\_of\\_Fog\\_Process\\_on\\_the\\_Size\\_Distribution\\_of\\_Polycyclic\\_Aromatic\\_Hydrocarbons\\_in\\_the\\_Atmospheric\\_Aerosol\\_PM10](https://www.researchgate.net/publication/283957537_Effect_of_Fog_Process_on_the_Size_Distribution_of_Polycyclic_Aromatic_Hydrocarbons_in_the_Atmospheric_Aerosol_PM10). [Accessed: Jul 14, 2019]
- [21] E.Strater, A. Westbeld, and O. Klemm, "Pollution in coastal fog at Alto Patache, Northern Chile", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 17, no. 9, pp. 1563–1573, 2010. doi:10.1007/s11356-010-0343-x
- [22] T. Wrzesinsky, and O. Klemm, "Summertime fog chemistry at a mountainous site in central Europe", *Atmospheric Environment*, vol. 34, no. 9, pp. 1487–1496, 2000. doi: [10.1016/S1352-2310\(99\)00348-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00348-9)
- [23] M.V.M Jaén, "Fog water collection in a rural park in the Canary Islands (Spain)," *Atmospheric Research*, vol. 64, no. 1, pp. 239–250, 2002. doi:[10.1016/S0169-8095\(02\)00095-9](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00095-9)
- [24] M. Millet, A. Sanusi, and H. Wortham, "Chemical composition of fogwater in an urban area: Strasbourg (France)", *Environmental Pollution*, vol. 94, no. 3, pp. 345–354, 1996. doi: [10.1016/S0269-7491\(96\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00064-4)
- [25] S. Fan, X. Yang, T. Fan, and F. Han, "Metal elements and water-soluble anion concentrations in winter fog water in Nanjing," *Huanjing Kexue Xuebao / Acta Scientiae Circumstantiae*, vol. 29, no. 9, pp. 1878–1885, 2009. [On line]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/287953233\\_Metal\\_elements\\_and\\_water-soluble\\_anion\\_concentrations\\_in\\_winter\\_fog\\_water\\_in\\_Nanjing](https://www.researchgate.net/publication/287953233_Metal_elements_and_water-soluble_anion_concentrations_in_winter_fog_water_in_Nanjing). [Accessed: March 14, 2019]
- [26] C. Lu, S. Niu, L. Tang, J. Lv, L. Zhao, and B. Zhu,B, "Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics", *Atmospheric Research*, vol. 97, no. 1-2, pp 47–69, 2010. doi: [10.1016/j.atmosres.2010.03.007](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.03.007)
- [27] K. Ali, G. Momin, S. Tiwari, P. Safai, D. Chate, and P. Rao, P, "Fog and precipitation chemistry at Delhi, North India", *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 25, pp. 4215–4222, 2004. doi: [10.1016/j.atmosenv.2004.02.055](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.055)
- [28] M. Błás, Z. Polkowska, M. Sobik, K. Klimaszewska, K. Nowinski, and J. Namiesnik, "Fog water chemical composition in different geographic regions of Poland," *Atmospheric Research*, vol. 95, no. 4, pp. 455–469, 2010. doi: [10.1016/j.atmosres.2009.11.008](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.11.008)
- [29] B. Arends, G. Kos, R. Maser, D. Shell, W. Wobrock, P. Winkler, J. Ogren, K. Noone, A. Hallberg, B. Svenningsson, A. Wiedensohler, H. Hansson, A. Berner, I. Solly, and C. Krusiz, "Microphysics of clouds at Kleiner Feldberg," *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 19, no. 2, pp. 59–85, 1994. doi: [10.1007/BF00696583](https://doi.org/10.1007/BF00696583)
- [30] S.Fuzzi, M. Facchini, G. Orsi, G. Bonforte, W. Martinotti, G. Ziliani, P. Mazzaliti, M. Grosa, E. Rampado, P. Vitali, R. Raffaeelli, A. Gianpaolo, and S. Grotti, "The NEVALPA project: A regional network for fog chemical climatology over the Po Valley basin," *Atmospheric Environment*, vol. 30, no. 2, pp. 201–213, 1996. doi: [10.1016/1352-2310\(95\)00298-D](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00298-D)
- [31] D. Moller, K. Acker, and W. Wiprecht, "A relationship between liquid water content and chemical composition in clouds," *Atmospheric Research*, vol. 41, no. 3, pp. 321–335., 1996. doi: [10.1016/0169-8095\(96\)00017-8](https://doi.org/10.1016/0169-8095(96)00017-8)
- [32] W. Elbert, M. Hoffmann, M. Kramer, G. Schmitt, and M. Andreae, "Control of solute concentrations in cloud and fog water by liquid water content," *Atmospheric Environment*, vol. **34**, no. **7**, pp. 1109–1122, 2000. doi:[10.1016/S1352-2310\(99\)00351-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00351-9)
- [33] M.Y. Igawa, T. Tsutsumi, T. Mori, and H. Okochi, "Fogwater chemistry at a mountainside forest and the estimation of the air pollutant deposition via fog droplets based on the atmospheric quality at the mountain base," *Environmental Science & Technology*, vol. 32, no. 11, pp. 1566–1572, 1998. doi:10.1021/es970213x
- [34] B. Bao, J. Shu, and B. Zhu, "Study on physicochemical properties of urban fog in Shanghai," *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, vol. 18, no. 1, pp. 114–118, 1995. [On line]. Available: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotal-NJQX501.016.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-NJQX501.016.htm). [Accessed: May 19, 2019]
- [35] E. Beiderwieden, T.Wrzesinsky, and O. Klemm, "Chemical characterization of fog and rain water collected at the eastern Andes cordillera," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 9, no. 3, pp. 185–19, 2005. [On line]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00304817/document>. [Accessed: May 19, 2019]
- [36] J. Fisak, M. Tesar, D. Rezacova, V. Elias, V. Weignerova, and D. Fottova, "Pollutant concentrations in fog and low cloud water at selected sites of the Czech Republic," *Atmospheric Research*, vol. 64, no. 1-4, pp. 75–87, 2002. doi:[10.1016/S0169-8095\(02\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00081-9)



- [37] C. Gordon, R. Herrera, and T. Hutchinson, "Studies of fog events at two cloud forests 20 km near Caracas, Venezuela: II. Chemistry of fog," *Atmospheric Environment*, vol. 28, no. 2, pp. 323–337, 1994. doi:10.1016/1352-2310(94)90108-2
- [38] J. Walmsley, R. Schemenauer, and H. Bridgman, "A method for estimating the hydrologic input from fog in mountainous terrain," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35, pp. 2237–2249. doi:10.1175/1520-0450(1996)035<2237:AMFETH>2.0.CO;2
- [39] M. Keller, D. Jacob, S. Wofsy, and R. Harris, "Effects of tropical deforestation on global and regional atmospheric chemistry," *Climate Change*, vol. 19, no. 1-2, pp. 139–158., 1991. [On line].: doi:10.1007/BF00142221, [Accessed : May 19, 2019]
- [40] A. Tang, G. Zhuang, Y. Wang, H. Yuan, and Y. Sun, "The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing," *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 19, pp. 3397–3406, 2005. "doi: 10.1016/j.atmos-env.2005.02.001"
- [41] Z. Xu, Y. Wu, W. Liu, C. Liang, J. Ji, T. Zhao, and X. Zhang, "Chemical composition of rainwater and the acid neutralizing effect at Beijing and Chizhou city, China," *Atmospheric Research*, vol 164–165, pp. 278–285, 2015. "doi: 10.1016/j.atmosres.2015.05.009"
- [40] D. Gillette, and P. Sinclair, " Estimation of suspension of alkaline material by dust devils in the United States," *Atmospheric Environment*, vol. 24, no. 5, pp. 1135–1142, 1990. doi: 10.1016/0960-1686(90)90078-2
- [41] N. Rastogi, and M. Sarin, "Chemical characteristics of individual rain events from a semiarid region in India: Three-year study," *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 18, pp. 3313–3323, 2005. doi: 10.1016/j.atmos-env.2005.01.053
- [42] H.W. Niu, Y.Q. He, X.X. Lu, J. Shen, J.K. Du, T. Zhang, T. Pu, H.J. Xin, and L. Chang, "Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow in the Mt. Yulong region, southeastern Tibetan plateau," *Journal of Asian Earth Science*, vol. 94, pp. 45–54, 2014. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.08.003
- [43] W. Yao, X. Zhifang, L. Wenjing, Z. Tong, X. Zhao, X. H. Jiang, H. Y. Chong, Z. Li, and Z. Xiaode, "Chemical compositions of precipitation at three non-urban sites of Hebei Province, north China: Influence of terrestrial sources on ionic composition," *Atmospheric Research*, vol. 181, pp. 115–123, 2016.
- [44] D. Migliavacca, E.C. Teixeira, F. Wiegand, A.C.M. Machado, and J. Sanchez, "Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil," *Atmos. Environ*, vol. 39, no. 10, pp. 1829–1844, 2005. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.06.009
- [45] Z. Xu, and G. Han, "Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in Beijing, China," *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 12, pp. 1954–1961, 2005. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.01.010
- [46] D.Y. Huang, Y.G. Xu, P. Peng, H.H. Zhang, and J.B. Lan, "Chemical composition and seasonal variation of acid deposition in Guangzhou, South China: Comparison with precipitation in other major Chinese cities," *Environmental Pollution*, vol. 157, no. 1, pp. 35–41, 2009. doi: 10.1016/j.envpol.2008.08.001
- [47] T.Larssen, A. Semb, J. Mulder, I. Muniz, R. Vogt, E. Lydersen, V. Angell, T. Dagang, O. Eilester, and H.M. Seip, "Acid deposition and its effects in China: An overview," *Environmental Science & Policy*, vol. 2, no. 1, pp. 9–24, 1999. doi: 10.1016/S1462-9011(98)00043-4
- [48] A. LaBastille, and D.J. Pool, "On the need for a system of cloud forests parks in Middle-America and Caribbean," *Environmental Conservation*, vol. 5, no. 3, pp. 183–190, 1978. doi: 10.1017/S0376892900005890
- [49] W.Liu, F.R. Meng, Y.P. Zhang, Y.H. Liu, and H.M. Li, " Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, southwest China," *Journal of Tropical Ecology*, vol. 20, no. 5, pp. 417–424, 2004. doi: 10.1017/S0266467404001890.
- [50] J. Wen, P. Yi, M. Hong, F. Meng, H. Yu, and M. Chang, "Fog and Rainwater Chemistry in the Tropical Seasonal Rain Forest of Xishuangbanna, southwest China," *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 167, no. 1-4, pp. 295–309, 2005. [On line]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-005-0080-9>, [Accessed: May 20, 2019]
- [51] P. Herckes, L. Trenary, M.P. Hannigan, T. Lee, and Jr.J..L. Collett, in *Cloud and fog processing of atmospheric organic compounds*, R. S. Schemenauer and H. Puxbaum, Eds. Canada, 2001.
- [52] F. Joos, and U. Baltensperger, "A field study on chemistry S(IV) oxidation rates and vertical transport during fog conditions," *Atmospheric Environment*, vol. 25, no. 2, pp. 217– 230, 1991. doi: 10.1016/0960-1686(91)90292-F
- [53] R.M. Cox, J. Spavold-Tims, and R.N. Hughes, "Acid fog and ozone: Their possible role in birch deterioration around the Bay of Fundy, Canada," *Water Air Soil Pollution*, vol. 48, no. 1-2, pp. 263–276, 1989. [On line ]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00282383>, [Accessed: March 14, 2019]

- [54] M.H. Unsworth, "Evaporation from forests in cloud enhances the effects of acid deposition," *Nature International Journal of Science*, vol. 312, pp. 262–264, 1984. <https://www.nature.com/articles/312262a0>
- [55] J.Jr. Collett, K.J. Hoag, X. Rao, and S.N. Pandis, "Internal acid buffering in San Joaquin Valley fog drops and its influence on aerosol processing," *Atmospheric Environment*, vol. 33, no. 29, pp. 4833–4847, 1999. doi: [10.1016/S1352-2310\(99\)00221-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00221-6)
- [56] G.M. Lovett, "Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: An ecological perspective," *Ecological Application*, vol. 29, no. 4, pp. 629–650, 1994. doi: [10.2307/1941997](https://doi.org/10.2307/1941997)
- [57] R.S. Schemenauer, "Acidic deposition to forests: The 1985 Chemistry of High Elevation Fog (CHEF) project," *Atmosphere-Ocean*, vol. 24, no. 4, pp. 303–328, 1986. doi: [10.1080/07055900.1986.9649254](https://doi.org/10.1080/07055900.1986.9649254)
- [58] V.K. Saxena, and N.H. Lin, "Cloud chemistry measurements and estimates of acidic deposition on an above cloudbase coniferous forest," *Atmospheric Environment* vol. 24, no. 2, pp. 329–352, 1990. doi: [10.1016/0960-1686\(90\)90113-2](https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90113-2)
- [59] E.D. Eckardt, and R.S. Schemenauer, "Fog water chemistry in the Namib Desert, Namibia," *Atmospheric Environment*, vol. 32, no. 14-15, pp. 2595–2599, 1998. doi: [10.1016/S1352-2310\(97\)00498-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00498-6)
- [60] R. S. Schemenauer, and P. Cereceda, "Monsoon cloud water chemistry on the Arabian Peninsula," *Atmospheric Environment*, vol. 26, no. 9, pp. 1583–1587, 1992. doi: [10.1016/0960-1686\(92\)90058-S](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90058-S)
- [61] J. Jr. Collett, K.J. Hoag, X. Rao, and S.N. Pandis, "Internal acid buffering in San Joaquin Valley fog drops and its influence on aerosol processing," *Atmospheric Environment*, vol. 33, no. 29, pp. 4833– 4847, 1999. doi: [10.1016/S1352-2310\(99\)00221-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00221-6)
- [62] T. Vásquez, R. Alfaro, J. Sibaja, G. Esquivel y J. Valdés, "Composición química del agua de lluvia y de niebla recolectada en la Reserva Biológica 'Monteverde,'" *Uniciencia*, vol. 26, no. 1-2 pp. 51-63, 2012. [On line]. Available: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/3862/3703>. [Accessed: Jun 6, 2019 ]
- [63] K. Bolaños, J. Sibaja, J. Mora, D. Umaña, M. Cambronero, L. Sandolval y M. Martínez, "Estudio preliminar sobre la composición atmosférica del agua de lluvia en y los alrededores del Parque Nacional del Volcán Poás", en Y. Morales-López (Ed.), *Memorias del I Congreso Internacional de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional, Costa Rica*, Universidad Nacional, Heredia, e142, pp. 1-11, 2019. doi: 10.15359/cicen.1.29

# Exposición ocupacional a radiaciones ultravioleta UVA/UVB de los trabajadores agrícolas de la provincia de Cartago, Costa Rica

## Occupational exposure to ultraviolet radiation (UVA/UVB) in agricultural workers in Cartago, Costa Rica

Tannia Araya-Solano<sup>1</sup>, Esteban Arias-Monge<sup>2</sup>,  
Andres Robles-Ramírez<sup>3</sup>, Ara Villalobos-Rodríguez<sup>4</sup>

Fecha de recepción: 29 de setiembre de 2019

Fecha de aprobación: 3 de febrero de 2020

Araya Solano, T; Arias Monge, E; Robles Ramirez, A; Villalobos Rodriguez, A. Exposición ocupacional a radiaciones ultravioleta UVA/UVB de los trabajadores agrícolas de la provincia de Cartago, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 104-114.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4486>

- 1 M.Sc. Salud Ocupacional. Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Costa Rica. Correo electrónico: [taraya@tec.ac.cr](mailto:taraya@tec.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0001-9465-1530>
- 2 M.Sc. Salud Ocupacional. Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Costa Rica. Correo electrónico: [esarias@tec.ac.cr](mailto:esarias@tec.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0001-9728-5310>
- 3 Mtr. en Sistemas de Manufactura. Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Costa Rica. Correo electrónico: [anrobles@tec.ac.cr](mailto:anrobles@tec.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-5227-5685>
- 4 Mtr. en Gestión de Proyectos. Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Costa Rica. Correo electrónico: [avillalobos@tec.ac.cr](mailto:avillalobos@tec.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0003-3340-8136>



## Palabras clave

Radiación ultravioleta; exposición solar; trabajadores agrícolas.

## Resumen

La radiación ultravioleta constituye una fuente de riesgo para el sector agrícola; en Costa Rica no se han publicado datos sobre la exposición a este agente físico. Por tal motivo, se desarrolló una investigación exploratoria con dos asociaciones de agricultores ubicadas en la zona norte y El Guarco, en la provincia de Cartago, cuyo objetivo fue el de cuantificar el nivel de radiación ultravioleta al que se exponen los colaboradores de las zonas agrícolas, así como estimar la dosis eritema estándar y establecer una matriz para determinar el nivel de riesgo por exposición a la radiación solar. Las mediciones iniciaron en noviembre de 2015 y finalizaron en enero de 2017, en horario de 6:00 hasta las 15:00 horas aproximadamente, iniciando en noviembre de 2015 y finalizando en enero de 2017; se aplicaron métodos estadísticos como promedios ponderados, máximos, mínimos y desviación estándar de los datos obtenidos y una encuesta a los trabajadores para determinar el fototipo de piel y las zonas de esta más expuestas.

Los principales resultados mostraron que la irradiación mínima reportada fue de 1,9 W/cm<sup>2</sup> y la máxima, de 160,9 W/cm<sup>2</sup>; los niveles promedio más altos se reportaron entre las 10:00 y las 13:00 horas. La época del año con mayor nivel de irradiación fue la seca, en la zona alta, con 167 W/cm<sup>2</sup> como máximo. La dosis eritema estándar estuvo entre 2,3 SED y 9,8 SED, que sobrepasa lo recomendado por la Comisión Internacional de Iluminación (1,09 SED). El índice de radiación ultravioleta se encontró entre 8 y 12, clasificado como alto y muy alto. Bajo las condiciones descritas podría aumentar el riesgo para los colaboradores de las fincas agrícolas, de eritemas en la piel. Se planteó la matriz de riesgo por exposición, tomando en cuenta aspectos como tarea o puesto, altitud, época del año, nivel de irradiación, parte del cuerpo expuesta y fototipo de piel.

## Keywords

Ultraviolet radiation; solar exposure; agricultural workers.

## Abstract

Ultraviolet radiation constitutes a source of risk for the agricultural sector. In Costa Rica, no data have been published on the exposure to this physical agent, for this reason an exploratory research has been developed whose objective was to quantify the level of ultraviolet radiation to which the collaborators of the agricultural areas (north zone and El Guarco, in Cartago) are exposed, as well as to estimate the standard erythema dose. The radiation level was measured from 6:00 until approximately 15:00 hour. The data were analyzed using statistical methods, and farm workers were surveyed to determine the skin phenotype, most exposed areas of the skin, and other information. The main results showed that the minimum irradiance reported was 1,9 W/cm<sup>2</sup>, and the maximum was 160,9 W/cm<sup>2</sup>; the highest average levels were reported between 10:00 and 13:00 hours. The time of the year with the highest level of irradiance was the dry season, in the north zone, with 167 W/cm<sup>2</sup> as maximum. The standard erythema dose was estimated between 2,3 and 9,8, exceeding that recommended by the International Commission on Illumination. The ultraviolet index was found between 8 and 12, classified as high and very high. Under the conditions described, the risk of erythema for the collaborators in the farms was increased. A matrix is proposed to determine risk by exposure, taking into account aspects such as task or position, altitude, time of year, level of irradiance, part of the body exposed, and skin phenotype.

## Introducción

Las radiaciones corresponden a una forma de energía con un amplio espectro electromagnético [1], que contiene luz ultravioleta, luz visible y la radiación infrarroja, entre otras longitudes de onda [2]. Específicamente, la radiación ultravioleta comprende a una parte de la energía radiante que proviene del sol [3], que tiene longitudes de onda más cortas que la luz visible, pero más largas que los rayos X [4], en el rango de 200 a 400 nanómetros [5], y se distribuye como luz ultravioleta A, B y C. Las radiaciones A y B son las que inciden en la superficie de la Tierra y, por lo tanto, en nuestra piel [6], debido a que la C es filtrada en su totalidad por la capa de ozono [7].

Si bien la capa de ozono actúa como un escudo que protege a los organismos y ecosistemas de las consecuencias que se podrían generar producto de la radiación ultravioleta [8], la disminución de ella ha dado lugar a la necesidad de comunicar a la población sobre los posibles efectos que se pueden presentar en las personas [9].

Los efectos en la salud por la radiación ultravioleta principalmente se manifiestan en daños en la piel [10]. Según Zuluaga [2], pueden ser agudos o crónicos; el daño agudo es el que se presenta como una quemadura solar y el daño crónico, el que produce fotoenvejecimiento y formación de cataratas corticales [11]. Entre otras de las lesiones por la exposición a radiación ultravioleta se encuentra el cáncer de piel [12] [13], el cual ha tenido un considerable aumento en su incidencia [14], principalmente por la exposición prolongada a rayos B, debido a que estos penetran en la piel afectando la epidermis y, por ende, generando daño en el ADN [6], así como a rayos A, los que aumentan el número de células inflamatorias dérmicas [15].

En nuestro país, el cáncer de piel es el tipo más frecuente. Para el 2016, la tasa de incidencia de tumores en piel era de 58,04%, en hombres provenientes de la Gran Área Metropolitana [16]. En países como los Estados Unidos, ocurren aproximadamente un millón de nuevos casos de este tipo de cáncer anualmente [17], debido a conductas inadecuadas como la exposición solar desde edades muy tempranas, o el aplicarse el bloqueador solar en una sola ocasión al día, entre otras [18].

Uno de los principales factores de riesgo relacionado con muchos tipos de cáncer corresponde a las condiciones ambientales [19]. Específicamente en el riesgo de cáncer de piel, los niveles de radiación pueden ser influenciados por la hora del día [20], la localización geográfica o los elementos de la topografía [13] como montañas, lagos o valles, los cuales inciden en la cantidad de radiación que recibe un lugar [21]. Las condiciones climáticas, especialmente las nubes, por otra parte, pueden tener un efecto positivo en la reducción de gran parte de la energía solar [22], especialmente la infrarroja, llegando a evitar el paso de hasta un 50% o más de la UVB [11].

El aumento de las lesiones en la piel producto de la radiación ultravioleta también se asocia a intensidad [23] y su distribución sobre el cuerpo [24], y afecta principalmente a las personas que trabajan durante largas horas, expuestas a las radiaciones ultravioleta [25], especialmente en labores que se realizan al aire libre [26], como los trabajos agrícolas [27].

De acuerdo a Gies, Glanz, O'Riordan *et al.* [28] los trabajadores al aire libre son grupos que reciben radiación solar ultravioleta en forma regular y en dosis significativas, que con frecuencia sobrepasan los valores recomendados [28]. Frente a este hecho, factores como el índice ultravioleta (IUV), el cual es una medida de la radiación ultravioleta proveniente del sol en la superficie de la Tierra y es un indicador cuantitativo del efecto de este tipo de radiación sobre la piel humana, permiten generar conciencia en la población trabajadora sobre la importancia de tomar medidas de protección ante la exposición a la radiación UV [29]. Además, valores como la dosis eritema estándar (SED), que establece un límite de dosis recomendado (TLV) de

109J/m<sup>2</sup> (equivalente a 1,09 SED) para un periodo de 8 horas [30], tienen como fin proteger a los trabajadores de los posibles efectos de la radiación ultravioleta en la salud [31].

Consecuente con lo anterior, el proyecto que aquí se resume tuvo como objetivo cuantificar el nivel de radiación (UVA/UVB) y conocer las variables que pueden tener mayor incidencia en el riesgo, para generar un modelo de exposición que sirva de insumo en la toma de decisiones de alcance nacional por parte de las diferentes entidades de Salud. El proyecto obedece a la urgencia de programas de protección contra la radiación solar que impulsen cambios en los estilos de vida, según lo indica la Organización Mundial de la Salud [30], para frenar la tendencia al aumento de los casos de cáncer de piel.

## Metodología

La investigación se realizó en la provincia de Cartago, específicamente en Tierra Blanca (9° 55' N, 83° 53' W, con una altitud mayor de 2080 m sobre el nivel del mar) y Tejar del cantón de El Guarco (9° 50' N, 83° 59' W, con una altitud de 1440 m sobre el nivel del mar) en la época lluviosa y la época seca.

En el estudio participaron los trabajadores de fincas pertenecientes a la Asociación de Horticultores del Irazú (AHSORI) y la Asociación de Agricultores de El Guarco (AGRIRETEC). El estudio incluyó un total de 16 fincas; la muestra, seleccionada de las fincas, fue determinada a conveniencia, para un total de 34 adultos, todos hombres.

*Encuesta higiénica:* Al inicio de la investigación se visitó cada una de las fincas dispuestas a participar, con el fin de aplicar la encuesta higiénica, para luego plantear la estrategia de muestreo. Entre los aspectos que se tomaron en cuenta figuran jornada laboral, tipo de cultivo y lugar exacto de la finca.

De acuerdo a Sierra [32], el incidente ponderado de eritema en sitios anatómicos durante un período específico de tiempo se conoce como *exposición a la radiación ultravioleta (RUV)*.

*Irradiación:* se midió con un radiómetro (Sper Scientific UVA/B Light Meter, Modelo 850009), que es un medidor de la luz ultravioleta (UV), para espacios naturales y artificiales. El radiómetro se colocó en un trípode, en posición sur (siempre con el uso de coordenadas geográficas) respecto a la posición del sol. El equipo registró datos cada 10 min durante toda la jornada.

*Niveles de irradiación:* Se calcularon promedios, máximos, mínimos y desviación estándar para los datos obtenidos por finca, así como los obtenidos por estación lluviosa y seca, y ubicación en zona alta y zona baja.

*Dosis eritema estándar (SED) del estudio(J/m<sup>2</sup>):* Se determinó el fototipo de los participantes según la clasificación de tipos de piel de Fitzpatrick [32], con base en una entrevista aplicada a cada trabajador sobre información personal (i.e., tipo de piel, color de cabello y ojos, tendencia al bronceado, áreas del cuerpo expuestas al sol, consideraciones sobre la vestimenta, hábitos de protección solar, tiempos de descanso, historial de trabajo e información familiar sobre el cáncer de piel).

Para proceder con el análisis de la RUV con relación a las actividades realizadas, se efectuaron observaciones, sin interacción con los participantes, considerando la postura asumida por el trabajador, los sitios anatómicos expuestos al sol y el equipo de protección personal utilizado. Se asignó un peso específico a cada una de las subcategorías indicando la medida de la exposición directa a la RUV según las actividades del ciclo de producción. La RUV diaria en cada finca, según los valores obtenidos de irradiación incidente en toda la jornada laboral, se describe por medio de las unidades SED. Se requiere, según Sierra [32], una exposición de

aproximadamente 1,5 a 3,0 SED para producir un eritema perceptible en la piel no aclimatada blanca, sin protección.

La estimación de SED en cada finca se calculó según la irradiación medida y los valores máximos obtenidos, tomando en consideración el periodo de las 11:00 a las 13:00 horas.

También se reportaron los datos del índice UV, según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

*Matriz para estimar el riesgo por exposición a la radiación solar:* Con la información obtenida de los valores de irradiación, características de la tarea (postura, vestimenta), fototipo de piel y demás variables, se procedió a la confección de una matriz que permitió establecer el nivel de riesgo, y no solo el nivel de irradiación, mediante la definición de la ecuación planteada.

Para efectos del estudio, las fincas se nombraron con letras mayúsculas iniciando en A terminando P.

## Resultados y discusión

### Datos generales

Los productores participantes en el proyecto se ubicaban en la zona norte y Tejar de El Guarco, de Cartago. De la primera ubicación participaron 14 fincas y de la segunda, 2 fincas, para un total de 16 fincas. En el momento de la toma de datos, las actividades realizadas eran la preparación del terreno, la siembra, la cosecha y el atomizado, de productos como zanahoria, cebolla y culantro. Todas las tareas se realizaban al aire libre. En la mayoría de los casos, los tiempos de comida igualmente se tomaban al aire libre; en algunos otros, se contaba con carpas o una bodega.

La jornada laboral comprendía entre 8 y 9 horas laborales, dependiendo de las tareas que se tuvieran que realizar.

Las fincas F y L se ubicaban en Tejar de El Guarco, y el resto en la zona norte de la provincia. La ubicación de las fincas se muestra en la figura 1.

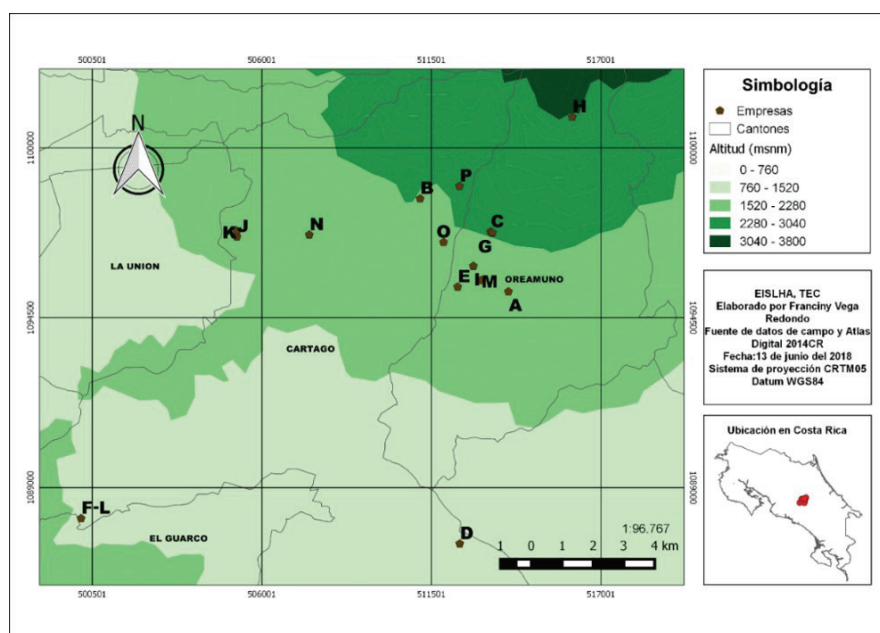


Figura 1. Ubicación de las fincas incluidas en el estudio.

## Niveles de irradiación UVA/UVB

Las mediciones de irradiación se realizaron entre las 7:00 y las 15:00 horas. En el cuadro 1 se muestran los promedios, la desviación estándar, los máximos y mínimos de los niveles de irradiación obtenidos por cada finca, así como datos generales de ellas.

**Cuadro 1.** Niveles de irradiación promedio, desviación estándar, máximo y mínimo medidos en W/m<sup>2</sup> para cada una de las fincas, así como ubicación, altitud, cantidad de trabajadores y tipo de cultivo.

| Nº Finca | Min (W/cm <sup>2</sup> ) | Prom (W/cm <sup>2</sup> ) | Max (W/cm <sup>2</sup> ) | DE   | Altitud (m.s.n.m) | Latitud   | Longitud   | Cant. trabajadores (población) |
|----------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|------|-------------------|-----------|------------|--------------------------------|
| A        | 16,5                     | 52,8                      | 95,9                     | 19,9 | 1989              | 9°54'21"N | 83°52'20"O | 20                             |
| B        | 23,9                     | 96,3                      | 151,9                    | 32,3 | 2181              | 9°55'59"N | 83°53'54"O | 15                             |
| C        | 30,1                     | 85,5                      | 153,7                    | 32,2 | 2281              | 9°55'24"N | 83°52'39"O | 5                              |
| D        | 18,4                     | 70,4                      | 139,9                    | 29,9 | 2305              | 9°55'53"N | 83°53'15"O | 7                              |
| E        | 3,1                      | 45,7                      | 85,1                     | 33,8 | 2030              | 9°54'26"N | 83°53'14"O | 18                             |
| F        | 1,9                      | 48,2                      | 101,1                    | 27,6 | 1476              | 9°50'22"N | 83°59'55"O | 10                             |
| G        | 33,2                     | 110,6                     | 167                      | 38,6 | 2262              | 9°55'23"N | 83°52'37"O | 6                              |
| H        | 29,3                     | 111,6                     | 160,9                    | 38,1 | 3062              | 9°57'25"N | 83°51'12"O | 6                              |
| I        | 37,1                     | 111,5                     | 142,6                    | 35,4 | 2118              | 9°54'48"N | 83°52'57"O | 12                             |
| J        | 27,6                     | 93,3                      | 147,4                    | 40,7 | 2090              | 9°55'19"N | 83°57'09"O | 26                             |
| K        | 24,3                     | 95,0                      | 134,7                    | 33,9 | 2332              | 9°55'25"N | 83°57'09"O | 15                             |
| L        | 24,3                     | 86,7                      | 119,4                    | 26,9 | 1473              | 9°50'22"N | 83°59'55"O | 9                              |
| M        | 24,2                     | 87,9                      | 129                      | 32,6 | 2124              | 9°54'33"N | 83°52'49"O | 12                             |
| N        | 22,1                     | 45,4                      | 90                       | 29,6 | 1938              | 9°55'21"N | 83°55'52"O | 8                              |
| O        | 25                       | 81,2                      | 137,9                    | 35,7 | 2219              | 9°55'13"N | 83°53'29"O | 7                              |
| P        | 20,7                     | 79,3                      | 107,1                    | 28,9 | 2369              | 9°56'12"N | 83°53'12"O | 6                              |

De acuerdo con la información anterior, el promedio más alto se registró en la zona norte en condiciones soleadas y el más bajo, en Tejar, en un día nublado.

El nivel de irradiación es muy variable, por condiciones como la nubosidad presentada en el momento de realizar la medición, independientemente de la zona (alta o baja), por lo que no se pudo establecer una tendencia.

Se calculó el promedio, el máximo, el mínimo y la desviación estándar de los datos agrupados por franja horaria, ubicación (zona alta o baja) y época del año (ver cuadro 2).

Según la agrupación por franja horaria, en promedio entre las 13:00 y las 15:00 horas la irradiación fue mayor; sin embargo, el valor máximo se dio entre las 10:00 y las 12:59 horas. Este valor coincide con el reportado como máximo en la zona norte de Cartago y en época seca. Los datos de irradiación se pudieron ver afectados por la nubosidad que se presentó tanto en época seca como lluviosa.



**Cuadro 2.** Promedios, mínimos y máximos de la irradiación, en diferentes condiciones.

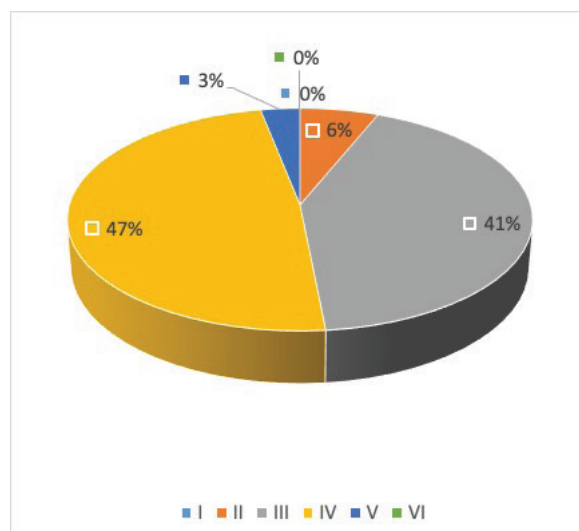
| Condición                      | Promedio (W/cm <sup>2</sup> ) | Máximo (W/cm <sup>2</sup> ) | Mínimo (W/cm <sup>2</sup> ) | Desv. est |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| Franja horaria                 |                               |                             |                             |           |
| 6:00-9:59                      | 57,6                          | 127,0                       | 0,3                         | 26,8      |
| 10:00-12:59                    | 94,9                          | 167,0                       | 3,1                         | 36,4      |
| 13:00-15:00                    | 95,8                          | 148,5                       | 8,6                         | 34,8      |
| Zona alta (zona norte)         | 83,9                          | 167,0                       | 0,3                         | 37,8      |
| Zona baja (Tejar de El Guarco) | 67,4                          | 119,4                       | 1,9                         | 33,4      |
| Seca                           | 90,5                          | 167,0                       | 0,30                        | 38,3      |
| Lluviosa                       | 72,1                          | 153,7                       | 1,90                        | 34,4      |

### Dosis eritema estándar (SED) en los trabajadores agrícolas

Con base en los resultados de la encuesta aplicada, se determinó que la postura ergonómica según la actividad realizada era de pie o inclinada; la vestimenta utilizada por los colaboradores era pantalón de mezclilla y camisa de botones y manga larga.

Las partes del cuerpo con mayor exposición al sol, para el total de los colaboradores, eran cara (100%), pecho (100%) y manos (50%).

Con respecto al tipo de piel, según la clasificación Fitzpatrick, se encontró que el fototipo predominante fue el IV, seguido del III, lo que significa una sensibilidad normal y tolerancia a la luz solar en la piel. En la figura 2 se muestra la información.



**Figura 2.** Fototipo de piel de los colaboradores. Fuente: M. Sierra, 2016

En el cuadro 3 se muestra el resultado del SED por cada finca.

**Cuadro 3.** Niveles máximos de radiación, SED, en cada una de las fincas.

| Nº Finsa | Max (W/m <sup>2</sup> ) | SED | Índice UV reportado por IMN |
|----------|-------------------------|-----|-----------------------------|
| A        | 95,9                    | 4,1 | 9                           |
| B        | 151,9                   | 7,4 | 9                           |
| C        | 153,7                   | 6,0 | 9                           |
| D        | 139,9                   | 6,0 | 9                           |
| E        | 85,1                    | 3,9 | 8                           |
| F        | 101,1                   | 2,3 | 10                          |
| G        | 167                     | 9,4 | 8                           |
| H        | 160,9                   | 9,8 | 10                          |
| I        | 142,6                   | 9,8 | 11                          |
| J        | 147,4                   | 9,1 | 12                          |
| K        | 134,7                   | 8,5 | 12                          |
| L        | 119,4                   | 7,2 | 12                          |
| M        | 129                     | 7,4 | 10                          |

Fuente: M. Sierra, 2016

La CIE (2001) indica que, si la exposición está entre 1,5 y 3,0 SED, se puede producir un eritema perceptible en la piel no aclimatada blanca sin protección [33]. En el estudio todos los individuos fueron aclimatados, pero los valores de SED resultaron mayores a los recomendados, por lo que se encontraban en riesgo.

De acuerdo a los datos obtenidos por el IMN, se registraron valores del índice UV categorizados como muy altos o extremos [34], lo que podía aumentar el riesgo de daños en la piel, especialmente en áreas como la cara, que como se mencionó anteriormente, fue una de las partes con mayor exposición al sol. Además, se encontró que, aunque los trabajadores utilizaban gorras o sombreros, la práctica de aplicación del bloqueador solar era realizada solamente una vez al día.

Se determinó que las horas más críticas fueron entre las 10:00 y las 13:00 horas en días de verano; después de las 13:00 horas el nivel decaía. Igualmente, en la época seca se encontró el nivel más alto de irradiación. Según Narvárez (2001), las nubes disminuyen la recepción de energía solar, y pueden evitar el paso de 50% o más de la UVB; este hecho se comprobó en las fincas B, C, D, E, F, G, H, N, O, Q y P, principalmente, donde se encontraron descensos en los niveles de radiación.

### Matriz para estimación de la RUV

Partiendo de los resultados expuestos, se elaboró la matriz para la determinación de la exposición a la radiación solar, la cual contempla la altitud de la zona geográfica en la cual se está desarrollando la tarea, la época del año en la cual se están tomando los datos de irradiación, la parte del cuerpo expuesta y el fototipo de piel. Estos valores se ponderan según el criterio de los investigadores y en función de los resultados del análisis de las variables, para proceder a obtener un nivel de riesgo por tarea específica evaluada, de manera tal que de dicha matriz se puede también obtener un nivel máximo de exposición y determinar cuáles variables poseen mayor peso en una evaluación a futuro.

Matriz para la estimación de la exposición a radiación solar

| Tarea o puesto | Altitud               |             | Época del año |          | Nivel de alarma de irradiancia |      | Parte del cuerpo expuesta |      |       | Fenotipo de piel |          |          | NR |
|----------------|-----------------------|-------------|---------------|----------|--------------------------------|------|---------------------------|------|-------|------------------|----------|----------|----|
|                |                       |             | Verano        | Invierno | ≤60                            | 60 ≤ | Cuello                    | Cara | Manos | Tipo 1-2         | Tipo 3-4 | Tipo 5-6 |    |
|                | 1400 msnm ≤ 1900 msnm | 1950 msnm ≥ |               |          |                                |      |                           |      |       |                  |          |          |    |
| Recolección    |                       |             |               |          |                                |      |                           |      |       |                  |          |          |    |
| Siembra        |                       |             |               |          |                                |      |                           |      |       |                  |          |          |    |
|                |                       |             |               |          |                                |      |                           |      |       |                  |          |          |    |
|                |                       |             |               |          |                                |      |                           |      |       |                  |          |          |    |

**Figura 3.** Matriz para la estimación de la RUV.

La matriz de la figura 3 parte de una ponderación propuesta por los investigadores que atiende a la ecuación (NR) y que tiene el potencial de ser aplicada y realimentada mediante su uso en evaluaciones de campo y futuras investigaciones.

$$NR = \text{altitud} + \text{época} + \text{nivel de alarma} + \text{partes del cuerpo expuestas} + \text{fototipo de piel}$$

En donde

*NR* = nivel de riesgo

*Altitud* = valor asignado según el rango de medición

*Época del año* = valor asignado según la estación (2 para verano; 1 para invierno)

*Nivel de alarma* = valor asignado de 2 al superar el valor de alarma

*Partes del cuerpo expuestas* = 1 por cada parte observada con exposición

*Fototipo de piel* = valor asignado según el fototipo (1-2:2);(3-4:1);(5-6:0)

## Conclusiones y recomendaciones

Los niveles de irradiación aumentan conforme transcurre el día, siendo las horas más críticas entre las 12:00 y las 13:00, por lo que existe un factor de riesgo relacionado con la hora en la que se encuentre laborando el trabajador.

La dosis eritema sobrepasa lo recomendado por la ICNIRP, (International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection) [31], por lo que hay probabilidad de que se presenten eritemas en los colaboradores; en cara, pecho y manos, que son las partes más expuestas de la piel.

Los resultados obtenidos no son los esperados debido a que algunas de las variables analizadas quedaron fuera del control tanto de las fincas participantes como de los investigadores, por ejemplo, las características de la vestimenta y algunos aspectos propios de posturas al realizar

la tarea; por tal motivo no se pudo realizar un modelo que permitiera efectuar una proyección, razón por la cual se plantea una matriz con una ecuación que permite establecer un nivel de riesgo.

Se recomienda contactarse con representantes de cámaras, para lograr mayor impacto en la difusión de los resultados; además, ampliar el estudio con nuevas investigaciones; también, trabajar con otros sectores, factor que a largo plazo permita beneficiar en mayor medida a la población.

## Agradecimientos

A la Asociación de Horticultores del Irazú (AHSORI) y la Asociación de Agricultores de El Guarco (AGRIRETEC), quienes hicieron posible este proyecto con la oportunidad brindada. También se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo para la realización de este proyecto. A la estudiante de posgrado Marcela Sierra y a los asistentes de investigación Geisel Segura, Daniel Sánchez y Dayana Picado, así como a Franciny Vega por su aporte.

## Referencias

- [1] K. N. Prasad, *Radiation Injury Prevention and Mitigation in Humans*. Florida: CRC Press, 2012.
- [2] Á. Zuluaga, "Cámaras bronceadoras: mitos y realidades", *Revista de la Asociación Colombiana de Dermatología y Cirugía Dermatológica*, pp. 205-210, 2009.
- [3] M. González Púmariega, M. Vernhes Tamayo y Á. Sánchez Lamar, "La radiación ultravioleta. su efecto dañino y consecuencias para la salud humana", *Theoría: Ciencia, Arte y Humanidades*, pp. 69-80, 2009.
- [4] International Food Information Service, *Dictionary of Food Science and Technology*, 2nd ed.. Shinfield: IFIS Publishing, 2009.
- [5] F. Henao Robledo, *Riesgos Físicos II.*, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2008.
- [6] C. Sordo y C. Gutiérrez, "Cáncer de piel y radiación solar: experiencia peruana en la prevención y detección temprana del cáncer de piel y melanoma", *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, pp. 113-117, 2013.
- [7] M. Olarte S., S. Hugo Sánchez, C. Fernando Aréchiga, R. Bañuelos V., E. Donají Ramírez y A. L. L. López L., "Daño y respuesta celular en piel por exposición prolongada a radiación UV", *ANACEM*, pp. 44-51, 2016.
- [8] N. Pérez Consuegra y L. A. Rodríguez, "Primeras señales de recuperación de la capa de ozono", *Hipótesis, Apuntes Científicos Uniandinos*, pp. 14-16, 2014.
- [9] CIE, "International Standard Gloval UV Index," Vienna, Austria, 2001.
- [10] C. Yaipen Salazar, E. Peralta Paima, H. Rojas Cubas, A. Vivar Chao, A. Herrera Toscani y C. Díaz Vélez, "Conocimiento y actitudes de medidas de protección solar en trabajadores agrícolas", *Revista del Cuerpo Médico del Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo*, pp. 207-211, Tután, mayo-junio 2014.
- [11] V. Narváez Rosales, "Los efectos de la radiación ultravioleta y conceptos básicos de la fotoprotección", *Dermatología Rev. Mex.*, pp. 278-283, 2001.
- [12] R. Hester and R. Harrison, *Causes and Environmental Implications of Increased UV-B Radiation*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2000.
- [13] J. P. Castanedo Cázares, B. Torres Álvarez, B. Portales González, K. Martínez Rosales y D. Hernández Blanco, "Análisis de la radiación solar ultravioleta acumulada en México", *Revista Médica del IMSS*, pp. 26-31, 2016.
- [14] M. V. Cuevas González, M. E. Vega Memije, P. Chairez Atienzo, A. G. García Calderón, J. L. González y J. C. Cuevas González, "Frecuencia de cáncer de piel en un centro de diagnóstico histopatológico en la ciudad de Durango, Durango, México", *Dermatología Revista Mexicana*, pp. 11-17, 2016.
- [15] D. R. Sambandan and D. Ratner, "Sunscreens: An overview and update," *JAM ACAD. DERMATOL.*, pp. 748-757, 2011.
- [16] "Plan Nacional para la Prevención y Control del Cáncer 2011-2017", Ministerio de Salud, San José, 2012.
- [17] R. Chang and J. W. Thoman, *Physical Chemistry for the Chemical Sciences*, University Science Books, 2014.

- [18] M. F. Gúémez Graniel, A. Plascencia Gómez, M. J. Graniel Lavadores y K. Dzul Rosado, "Epidemiología del cáncer de piel en el Centro Dermatológico de Yucatán durante 2012", *Dermatología Revista Mexicana*, pp. 9-18, 2015.
- [19] W. B. Grant, "An Estimate of Premature Cancer Mortality in the U.S. Due to Inadequate Doses of Solar Ultraviolet-B Radiation," *American Cancer Society*, pp. 1867-1874, 2002.
- [20] C. Young, "Solar ultraviolet radiation and skin cancer," *Occupational Medicine*, pp. 82-88, 2009.
- [21] K. Heinrich Bettoni, R. Pacheco Cubero, M. Solera Flores y M. Alfaro Hernández, "Series de brillo solar en Costa Rica", Ministerio de Ambiente y Energía, San José, 2013.
- [22] A. L. Molina y L. Ángela, "Vitamina D y piel", *Revista de la Asociación Colombiana de Dermatología y Cirugía Dermatológica*, pp. 239-252, 2012.
- [23] J. L. Pinedo Vega, R. Castañeda López, J. I. Dávila Rangel, F. Mireles García, C. Ríos Martínez y A. López Saucedo, "Incidencia de cáncer de piel en Zacatecas", *Revista Médica del IMSS*, pp. 282-289, 2014.
- [24] J. P. Castanedo Cázares, V. Lepe, A. Gordillo Moscoso y B. Moncada, "Dosis de radiación ultravioleta en escolares mexicanos", *Salud Pública de México*, vol. 45, n.º 6, pp. 439-444, 2003.
- [25] M. Ortega Resinas, F. Martín Gutiérrez y F. Camacho, "Medidas de la radiación solar ultravioleta en Sevilla", *Actas Dermosifiliogr.*, pp. 271-275, 2001.
- [26] C. E. Peters, P. A. Demers, S. Kalia, P. Hystad, P. J. Villeneuve, A.M. Nicol, N. Kreiger, and M. W. Koehoorn, "Occupational exposure to solar ultraviolet radiation and the risk of prostate cancer," *Occup. Environ. Med.*, pp. 742-748, 2016.
- [27] A. M. Siani, G. R. Casale, R. Sisto, A. Colosimo, C. A. Lang y M. G. Kimlin, "Occupational Exposures to Solar Ultraviolet Radiation of Vineyard Workers in Tuscany (Italy)," *Photochemistry & Photobiology*, pp. 925-934, 2011.
- [28] P. Gies, K. Glanz, D. O'Riordan, T. Elliott, and E. Nehl, "Measured Occupational Solar UVR Exposures of Lifeguards in Pool Settings," *American Journal of Industrial Medicine*, pp. 645-653, 2009.
- [29] "Índice UV solar mundial. Guía práctica". Ginebra: OMS (Organización Mundial de la Salud), 2003.
- [30] H. Suárez, J. Castillo, G. Salazar, D. Acosta, C. Cadena, M. Marín, P. Utrillas y L. J. Martínez, "Variabilidad diaria y anual de radiación solar eritémica en tres regiones de la provincia de Salta", de *Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, Argentina, 2014.
- [31] "ICNIRP Guidelines. On Limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm," ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), 2004.
- [32] J. M. Ríos Yuil, "Correlación entre las prácticas de exposición solar y el grado de fotodaño", *Revista Médico-científica*, pp. 4-11, Panamá, mayo, 2009.
- [33] M. Sierra, *Exposición ocupacional a radiación ultravioleta en poblaciones agrícolas de la provincia de Cartago*. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional, 2016.
- [34] "A Guide to the UV Index," EPA, Estados Unidos, 2004.

# Ajuste de diferentes modelos de crecimiento no lineal al rendimiento de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) a lo largo del ciclo de vida del cultivo, Costa Rica

Fitting different nonlinear growth models to oil palm (*Elaeis guineensis*) yield along the crop lifecycle, Costa Rica

Johanna Solórzano-Thompson<sup>1</sup>, Javier Paniagua-Molina<sup>2</sup>,  
David Barboza-Navarro<sup>3</sup>

Fecha de recepción: 3 de abril de 2020  
Fecha de aprobación: 30 de julio de 2020

Solórzano-Thompson, J; Paniagua-Molina, J; Barboza-Navarro, D. Ajuste de diferentes modelos de crecimiento no lineal al rendimiento de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) a lo largo del ciclo de vida del cultivo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 115-126.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.5096>



- 1 Máster en Economía Empresarial, Centro de Investigaciones en Economía Agrícola y Desarrollo Agroempresarial, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [johanna.solorzano@ucr.ac.cr](mailto:johanna.solorzano@ucr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-0276-6849>
- 2 Máster en Ciencias de la Administración y Dirección de Empresas, Universidad de Costa Rica., Costa Rica. Correo electrónico: [javier.paniagua@ucr.ac.cr](mailto:javier.paniagua@ucr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0003-2815-5437>
- 3 Bachiller en Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: [josdavbn@gmail.com](mailto:josdavbn@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-5444-3814>

## Palabras clave

Transformación de Box-Cox; eficiencia del pronóstico; regresión no lineal; aceite de palma; ciclo de vida del cultivo.

## Resumen

Esta investigación se enfocó en el cultivo de palma aceitera en la zona sur de Costa Rica, por el alto impacto que genera en el desarrollo económico de agricultores costarricenses. Se ajustó la curva de crecimiento del rendimiento de la palma aceitera a lo largo del ciclo de vida del cultivo y se comparó la eficiencia de pronóstico de ocho modelos de crecimiento no lineal con base en diferentes criterios estadísticos y pruebas de normalidad. Posteriormente, se aplicó el método de transformación Box-Cox para corregir la ausencia de normalidad en los residuos. Los modelos no lineales aplicados fueron adecuados para pronosticar el rendimiento de palma aceitera; el modelo Morgan-Mercer-Flodin produjo las mejores estadísticas de ajuste. Esta investigación constituye un insumo para las prácticas de renovación de plantaciones, así como para la valoración económica de cultivos que se prendan como garantía bancaria.

## Keywords

Box-Cox transformation; forecast efficiency; nonlinear regression; palm oil; crop life cycle.

## Abstract

This research focused on the oil palm crop in the southern zone of Costa Rica due to the high impact it generates on the economic development of Costa Rican farmers. The oil palm yield growth curve was adjusted along the crop life cycle, and the forecast efficiency of eight nonlinear growth models was compared based on different statistical criteria and normality tests. Then the Box-Cox transformation method was applied to correct the absence of normality. The applied nonlinear models were adequate to forecast oil palm yield, and the Morgan-Mercer-Flodin model produced the best fit statistics. This research constitutes an input for plantation renovation practices, as well as the economic valuation of crops that may be pledged as collaterals.

## Introducción

La industria de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) es participante del mercado mundial de aceites y grasas. De octubre de 2018 a septiembre de 2019, el consumo mundial de aceite de palma aumentó en 7,8 t, y América Latina contribuyó con 5,8% de la producción mundial en el mismo periodo [1]. Este crecimiento ha fomentado un avance en el desarrollo económico de áreas rurales en países como Colombia, Honduras, Perú, Ecuador, Nicaragua y Costa Rica [2].

En el año 2014 existían en Costa Rica cerca de 2 169 fincas con 66 420 hectáreas cultivadas de palma aceitera, que generaban empleo principalmente en áreas de bajo índice de desarrollo humano [3]. Para el 2018, la palma aceitera representaba el 8,1% de la producción nacional de las principales actividades agrícolas, solo por debajo de los cultivos de caña de azúcar, piña y plátano [4]. Esta información confirma la importancia del cultivo de palma aceitera para la calidad de vida en las zonas rurales, por la generación de empleo asociada a este cultivo, significativa en la lucha contra la pobreza. En Colombia, por ejemplo, los trabajadores del sector de palma aceitera han percibido ingresos diarios seis veces más altos que los ubicados en la línea de pobreza [5].

El C.I.F. Rotterdam es en el mundo uno de los precios de referencia más importantes del aceite de palma crudo y se caracteriza por una alta volatilidad, con ciclos de precios muy bajos en contraste con tiempos de “picos” más altos [6]. El sector de la palma aceitera no solo enfrenta este reto, sino que también está expuesto a los impactos negativos de las plagas y enfermedades. En los últimos cinco años, la producción costarricense se ha visto afectada por la enfermedad conocida como “pudrición del cogollo”, que disminuyó considerablemente la productividad y la entrega de fruta fresca para el procesamiento del aceite [7], [8]. Este hecho, junto con la caída aproximada del 50% en el precio internacional del crudo en diciembre de 2019 en comparación con el año 2012 [9], ha generado un efecto negativo y compromete la estabilidad económica de la industria y de los productores costarricenses.

Con estos impactos negativos, el productor necesita mantener una alta productividad en sus plantaciones para operar de manera eficiente. Esto hace de Costa Rica un escenario clave para el estudio de la dinámica del rendimiento de la palma aceitera a lo largo del ciclo de vida del cultivo, como base para futuras investigaciones que involucren un análisis costo-beneficio para determinar del momento óptimo de renovación de la plantación.

Para calcular las tasas de crecimiento en animales y rendimientos de cultivos, se han utilizado modelos no lineales con tasas de crecimiento proporcionales como el modelo Monomolecular, modelos simétricos y de crecimiento exponencial como el modelo Logistic, y asimétricos, con forma sigmoidea, como el Gompertz y sus derivados [10]–[13].

Por otra parte, se han realizado con frecuencia investigaciones en cultivos de ciclo anual, como el cultivo de cereales en la India, para el que se determinaron tasas de crecimiento de la producción de 2,36% y 2,38% con los modelos Logistic y Gompertz, respectivamente, los cuales se consideraron adecuados para modelar por la bondad del ajuste, según los criterios de Error Cuadrático Medio (MSE) y Error Absoluto Medio (MAE). Por otro lado, se descartó el modelo Monomolecular por presentar un parámetro de capacidad de crecimiento extremadamente alto [14].

La adaptabilidad de cereales como el trigo a diferentes condiciones climáticas ha favorecido su expansión mundial, siendo la India uno de los principales productores y consumidores. En una investigación del año 2014 se utilizaron modelos no lineales para estudiar las tendencias del crecimiento en el área, la producción y la productividad del cultivo de trigo en la India, aunque no fueron lo suficientemente dinámicos de acuerdo con los criterios del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ajustado, el MAE, la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y la normalidad de los residuos [15]. Otro estudio demostró una adaptación correcta de los modelos Logistic, Gompertz y Monomolecular para calcular las tasas de crecimiento del trigo y ajustar el pronóstico de los datos con estadísticas similares proporcionadas por los parámetros MAE, RMSE y Error de Porcentaje Absoluto Medio (MAPE) [16].

También se demostró que los modelos Monomolecular y Logistic presentaron un mejor ajuste que el modelo Gompertz en el rendimiento de maní en India, con respecto a los criterios  $R^2$ , MAE, RMSE y MAPE. Los resultados mostraron una tasa de crecimiento lenta y constante, y sobresalió la importancia de utilizar modelos no lineales, ya que pueden desempeñar un papel crucial en el desarrollo de políticas agrícolas [17].

Con respecto a la modelación del rendimiento en cultivos perennes, la disponibilidad de estudios no es abundante; esto se debe a la dificultad para obtener y registrar datos precisos en edades avanzadas de la plantación. Existen pocos estudios sobre la curva del rendimiento productivo de la palma aceitera a lo largo de su ciclo de vida, ya que la investigación se ha enfocado en medir el rendimiento productivo en función del índice de cosecha, el área foliar y la densidad de la plantación, además, de factores subyacentes a las brechas de rendimiento,



como la incidencia de plagas y enfermedades, la temperatura, la velocidad del viento y la profundidad del suelo [18], [19].

En Malasia, se comprobó el ajuste mediante diferentes modelos no lineales utilizando el rendimiento promedio de racimos de fruta fresca (FFB) de palma aceitera, con una observación para cada año. Los resultados mostraron que el rendimiento productivo aumentó vigorosamente hasta el décimo año después de la siembra y creció de manera constante hasta el vigésimo año. Con las estadísticas MSE, MAE, MAPE y la suma de cuadrados del error, se comprobó que el modelo Logistic ofrecía el mejor ajuste de pronóstico, seguido por los modelos Gompertz, Morgan-Mercer-Flodin, Chapman-Richard y Log-logistic. Los modelos Monomolecular y Exponencial Negativo no fueron apropiados porque no tienen un punto de inflexión ni forma sigmoidea [10].

Los estudios mencionados proporcionan información importante sobre el uso de modelos no lineales en la agricultura y contribuyen a futuras investigaciones sobre el valor económico del negocio. En el caso de la investigación que aquí se trata, se encontró la limitación de acceso a estudios previos de curvas de crecimiento en cultivos perennes como este, porque su larga vida útil (aproximadamente veinticinco años en el caso de la palma) dificulta el registro de datos precisos. Para contribuir con el estudio de curvas de crecimiento en cultivos perennes, el objetivo de esta investigación fue comparar la eficiencia de los pronósticos de diferentes modelos de crecimiento no lineal sobre el rendimiento de la palma aceitera en Costa Rica por medio de la aplicación de diferentes criterios estadísticos y pruebas de normalidad.

## Materiales y métodos

El estudio se realizó con productores de palma aceitera en la zona sur de Costa Rica, donde la actividad es de gran impacto en el desarrollo económico de la región. Se realizaron encuestas durante los años 2016 y 2017, con visitas a cada productor en sus respectivas fincas cuando fue posible. El número total de observaciones recolectadas corresponde a 460 fincas, con diferentes áreas de producción y rendimientos por hectárea. La variable dependiente de los modelos fue el rendimiento total anual en toneladas de racimos de fruta fresca por hectárea (FFB/ha) y no se consideró el rendimiento del aceite, ya que el propósito fue modelar el comportamiento en campo de la biomasa de interés económico para el sistema productivo primario. Los datos corresponden a productores con una gestión técnica considerada como promedio para la región en la que se realizó el estudio. El software utilizado para esta investigación fue R-Studio, con sus respectivas bibliotecas para el análisis de regresión no lineal.

Para ajustar la curva de crecimiento del rendimiento de la palma aceitera a través del tiempo, se utilizaron ocho modelos no lineales diferentes (cuadro 1). Posteriormente, se midió la eficiencia de pronóstico de los modelos y se comparó con los criterios estadísticos MAE, MSE, RMSE y MAPE, el logaritmo de máxima verosimilitud o *log likelihood* (logLik), el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC). En este caso, para dos o más modelos comparados con estos parámetros, cuanto menor fuera el parámetro obtenido para un modelo dado, mayor era su eficiencia de pronóstico.

Para los modelos del cuadro 1, es el rendimiento total anual en toneladas de FFB/ha de palma aceitera en el momento (años); es el valor asintótico o el potencial máximo esperado de la variable de respuesta; es una constante biológica en la que se alcanza el punto de inflexión de la curva de crecimiento; es la velocidad a la cual la variable de respuesta alcanza su potencial máximo; es una constante de crecimiento alométrico, y es el término de error aleatorio.

**Cuadro 1.** Modelos de crecimiento no lineal aplicados al rendimiento de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*)

| Modelo               | Ecuación  |     |
|----------------------|---|-----|
| Chapman-Richard's    | $Y_t = a \left( 1 - \beta \left( (e^{-\kappa t})^{\frac{1}{1-\delta}} \right) \right)$          | (1) |
| Gompertz             | $Y_t = \alpha e^{-\beta e^{-\kappa t}} + \epsilon_t$  | (2) |
| Log-logistic         | $Y_t = \frac{\alpha}{1 + \beta e^{-\kappa \ln(t)}} + \epsilon_t$                                | (3) |
| Logistic             | $Y_t = \frac{\alpha}{1 + \beta e^{-\kappa t}} + \epsilon_t$                                     | (4) |
| Monomolecular        | $Y_t = \alpha(1 - \beta e^{-\kappa t}) + \epsilon_t$  | (5) |
| Morgan-Mercer-Flodin | $Y_t = \alpha - \frac{\alpha - \beta}{1 + (\kappa t)^\delta} + \epsilon_t$                      | (6) |
| Richard's            | $Y_t = \frac{\alpha}{1 + \beta \left( (e^{-\kappa t})^{\frac{1}{\delta}} \right)} + \epsilon_t$ | (7) |
| Von Bertalanffy      | $Y_t = \alpha(1 - e^{-\kappa t}) + \epsilon_t$  | (8) |

Fuente: [10], [20]–[22]

También se aplicaron diferentes pruebas para evaluar la hipótesis de la normalidad de los residuos, como la Jarque-Bera (JB), la Shapiro-Wilk (SW), la Anderson-Darling (AD), la Lilliefors (LF), la Pearson (PS) y la Cramér-von Mises (CM). Para corregir la ausencia de normalidad en la serie de datos original, se aplicó la transformación Box-Cox (ecuación 9), que utiliza un único parámetro “lambda” ( $\lambda$ ), que puede tomar diferentes valores (positivos o negativos) para obtener la normalidad deseada en los datos [23].

$$Y_i(\lambda) = \begin{cases} \frac{Y_i^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln(Y_i), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (9)$$

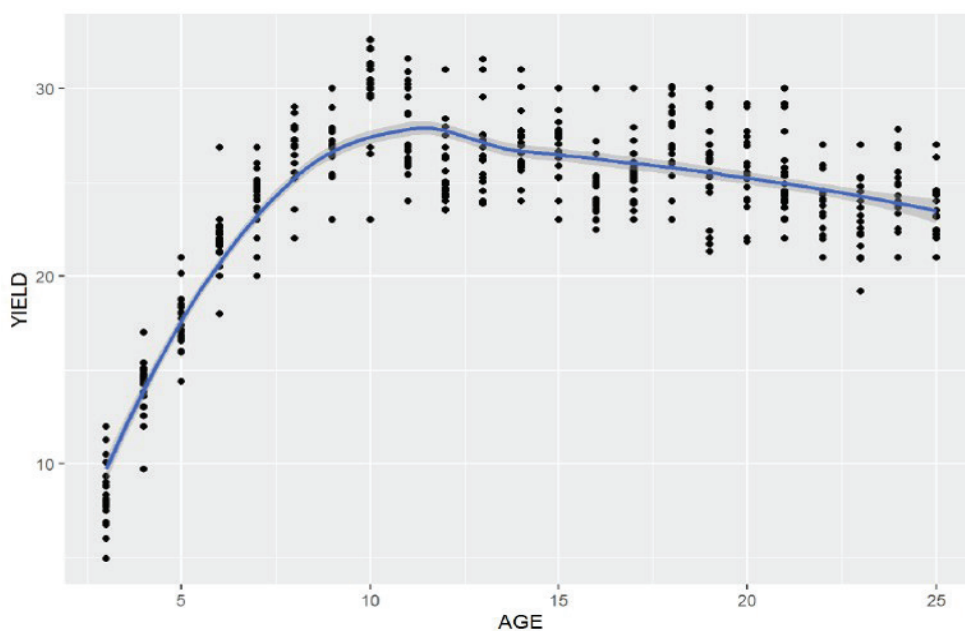
Donde  $Y_i$  representa la serie de datos original, con  $Y_i > 0$ , es decir, todos los valores de la serie original deben ser positivos. Para los casos en que  $\lambda > 0$ , la serie original se trabaja exponencialmente, y cuando  $\lambda < 0$  se aplica el logaritmo natural a la serie original; sin embargo, este último caso no se presentó en esta investigación.

## Resultados y discusión

En este estudio, se consideró a Khamis *et al.* [10] como el principal referente para el modelado de la curva de rendimiento en palma aceitera, con la salvedad de que un mayor número de variables independientes en los modelos no lineales hizo más compleja su modelación.

Además, la principal diferencia con el presente estudio fue que los datos utilizados en dicha investigación correspondían a una observación del rendimiento por año en un periodo definido y provenían de fuentes secundarias.

La curva de crecimiento del rendimiento de palma aceitera obtenida (figura 1) coincide con Khamis *et al.* y Woittiez *et al.* [10], [19], quienes describieron un crecimiento vigoroso en la producción hasta el décimo año después de la siembra y una etapa estable hasta el vigésimo año. Se puede observar una etapa de disminución en la producción después de alcanzar el máximo potencial productivo, que se obtuvo cerca del duodécimo año, con un rendimiento que oscila entre 25 y 30 t de FFB/ha.



**Figura 1.** Curva de crecimiento del rendimiento anual total de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en toneladas de racimos de fruta fresca por hectárea (FFB/ha).

Los resultados de la modelación muestran significancia estadística para la mayoría de los parámetros de los modelos no lineales aplicados (cuadro 2). Los modelos Logistic y Richard's presentaron los criterios de eficiencia de pronóstico más bajos (MAE, MSE, RMSE, MAPE, logLik, AIC y BIC), al contrario del modelo von Bertalanffy, que presentó los parámetros más altos. No obstante, no se puede asumir el supuesto de normalidad, pues al menos en cinco de las pruebas aplicadas se rechazó la hipótesis nula para cada modelo.

Después de aplicar la transformación Box-Cox (cuadro 3) a la serie de datos original de FFB, se obtuvo una mejora generalizada en la eficiencia de pronóstico de todos los modelos. El modelo Morgan-Mercer-Flodin probó la mayor eficiencia de pronóstico, a excepción de los criterios AIC y BIC, aunque la hipótesis de normalidad se rechazó con las pruebas SW, AD, PS y CM, con un nivel de significancia estadística del 5%. Los modelos que le siguieron en eficiencia de pronóstico fueron el Richard's, el Gompertz, el Log-logistic y el Logistic.

Con respecto a la normalidad de los residuos, se rechazó la hipótesis nula para los modelos Monomolecular, von Bertalanffy y Morgan-Mercer-Flodin, con al menos dos pruebas aplicadas, aunque con la prueba Jarque-Bera, se obtuvo normalidad en todos los casos, a excepción del modelo von Bertalanffy, para el cual se rechazó la hipótesis de normalidad bajo un nivel de significancia estadística de 0,1%.

**Cuadro 2.** Resultados de la modelación del rendimiento de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) sin transformación Box-Cox.

| Modelo no lineal sin Box-Cox |              | Parámetro     |                 |               |               | MAE  | MSE  | RMSE | MAPE | logLik   | AIC     | BIC     | JB        | SW             | AD             | LF            | PS             | CM            |
|------------------------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|------|------|------|------|----------|---------|---------|-----------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
|                              |              | $\alpha$      | $\beta$         | $\kappa$      | $\delta$      |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
| Chapman-Richard's            | Parámetro    | 25,96         | 9,9e-04         | 0,69          | 1,00          | 1,88 | 5,56 | 2,36 | 0,08 | -1047,00 | 2105,00 | 2126,00 | 7,77      | 0,99           | 1,50           | 0,04          | 45,57          | 0,21          |
|                              | Error Estnd. | 0,13          | 0,14            | 0,04          | 0,01          |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 0,99            | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>*** |      |      |      |      |          |         |         | 0,02<br>* | 1,9e-03<br>**  | 7,2e-04<br>*** | 0,07          | 1,5e-03<br>**  | 3,5e-03<br>** |
| Gompertz                     | Parámetro    | 25,96         | 9,70            | 0,69          |               | 1,88 | 5,56 | 2,36 | 0,08 | -1047,00 | 2103,00 | 2119,00 | 7,77      | 0,99           | 1,50           | 0,04          | 45,57          | 0,22          |
|                              | Error Estnd. | 0,13          | 1,46            | 0,04          |               |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 9,08e-11<br>*** | <2e-16<br>*** |               |      |      |      |      |          |         |         | 0,02<br>* | 1,9e-03<br>**  | 7,2e-04<br>*** | 0,07          | 1,5e-03<br>**  | 3,5e-03<br>** |
| Log-Logistic                 | Parámetro    | 26,01         | 250,51          | 4,13          |               | 1,94 | 5,88 | 2,43 | 0,09 | -1060,00 | 2129,00 | 2145,00 | 8,14      | 0,99           | 1,49           | 0,04          | 37,74          | 0,20          |
|                              | Error Estnd. | 0,14          | 80,73           | 0,23          |               |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 2e-03<br>**     | <2e-16<br>*** |               |      |      |      |      |          |         |         | 0,02<br>* | 1,9e-03<br>**  | 7,5e-04<br>*** | 0,08          | 0,01<br>*      | 6,1e-03<br>** |
| Logistic                     | Parámetro    | 25,94         | 28,91           | 0,86          |               | 1,85 | 5,41 | 2,33 | 0,08 | -1041,00 | 2090,00 | 2106,00 | 7,22      | 0,99           | 1,39           | 0,04          | 52,66          | 0,20          |
|                              | Error Estnd. | 0,13          | 6,00            | 0,05          |               |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 1,98e-06<br>*** | <2e-16<br>*** |               |      |      |      |      |          |         |         | 0,03<br>* | 2,9e-03<br>**  | 1,3e-03<br>**  | 0,15          | 1,5e-04<br>*** | 6,1e-03<br>** |
| Monomolecular                | Parámetro    | 25,97         | 3,57            | 0,54          |               | 1,94 | 5,88 | 2,43 | 0,09 | -1060,00 | 2129,00 | 2145,00 | 8,96      | 0,99           | 1,69           | 0,04          | 37,95          | 0,26          |
|                              | Error Estnd. | 0,14          | 0,38            | 0,03          |               |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>***   | <2e-16<br>*** |               |      |      |      |      |          |         |         | 0,01<br>* | 1,1e-03<br>**  | 2,5e-04<br>*** | 0,05<br>*     | 0,01<br>*      | 1,1e-03<br>** |
| Morgan-Mercer-Flodin         | Parámetro    | 25,93         | 8,05            | 0,21          | 6,22          | 1,88 | 5,51 | 2,35 | 0,08 | -1045,00 | 2100,00 | 2121,00 | 8,00      | 0,99           | 1,50           | 0,04          | 49,32          | 0,23          |
|                              | Error Estnd. | 0,13          | 0,84            | 0,01          | 0,67          |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>***   | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>*** |      |      |      |      |          |         |         | 0,02<br>* | 2,1e-03<br>**  | 7e-04<br>***   | 0,05<br>*     | 4,5e-04<br>*** | 2,2e-03<br>** |
| Richard's                    | Parámetro    | 25,83         | 20,44           | 122,93        | 158,17        | 1,83 | 5,35 | 2,31 | 0,08 | -1039,00 | 2087,00 | 2108,00 | 7,97      | 0,99           | 1,75           | 0,04          | 75,83          | 0,25          |
|                              | Error Estnd. | 0,12          | 5,45            | 5,46          | 10,42         |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 2e-04<br>***    | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>*** |      |      |      |      |          |         |         | 0,02<br>* | 7,7e-04<br>*** | 1,7e-04<br>*** | 0,05<br>*     | 4e-08<br>***   | 1,5e-03<br>** |
| Von Bertalanffy              | Parámetro    | 25,54         |                 | 0,85          |               | 2,15 | 7,08 | 2,66 | 0,10 | -1103,00 | 2212,00 | 2224,00 | 4,12      | 0,99           | 1,25           | 0,05          | 55,06          | 0,21          |
|                              | Error Estnd. | 0,13          |                 | 0,01          |               |      |      |      |      |          |         |         |           |                |                |               |                |               |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** |                 | <2e-16<br>*** |               |      |      |      |      |          |         |         | 0,13      | 0,02<br>*      | 2,9e-03<br>*   | 5,3e-03<br>** | 6,9e-05<br>*** | 3,6e-03<br>** |

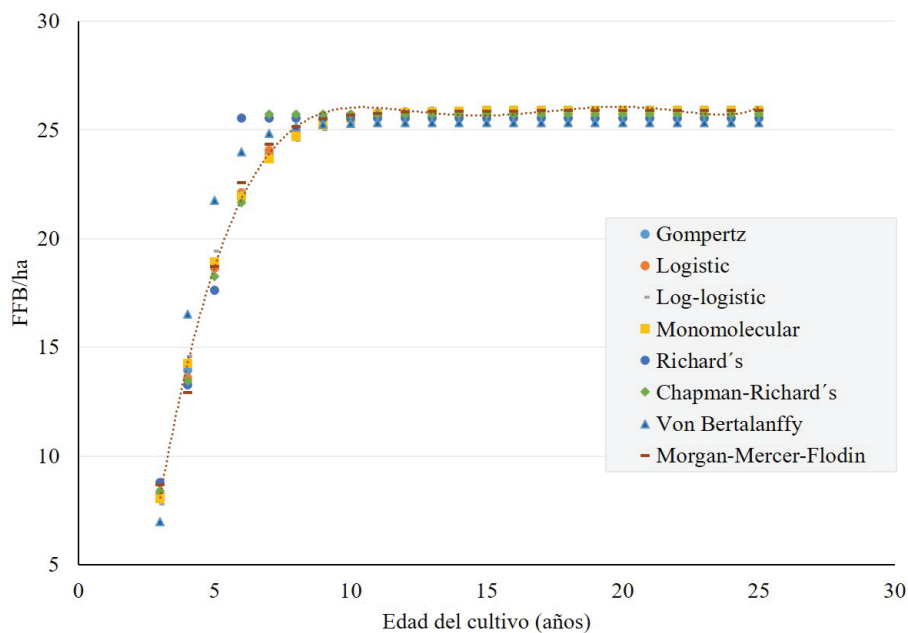
Nota: \* representa significancia estadística al 5%; \*\*, al 1%; \*\*\*, al 0,1%.

**Cuadro 3.** Resultados de la modelación del rendimiento de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) con transformación Box-Cox.

| Modelo no lineal con Box-Cox |              | Parámetro     |                |               |               | MAE   | MSE    | RMSE  | MAPE | logLik  | AIC     | BIC     | JB             | SW   | AD   | LF   | PS             | CM   |      |
|------------------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|-------|--------|-------|------|---------|---------|---------|----------------|------|------|------|----------------|------|------|
|                              |              | $\alpha$      | $\beta$        | $\kappa$      | $\delta$      |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
| Chapman-Richard's            | Parámetro    | 5,02          | 1,8e-03        | 0,70          | 1,00          | 19,22 | 390,05 | 19,75 | 0,79 | 44,70   | -79,40  | -58,70  | 1,11           | 1,00 | 0,62 | 0,03 | 28,34          | 0,09 |      |
|                              | Error Estnd. | 0,01          | 0,52           | 0,03          | 0,11          |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 1,00           | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>*** |       |        |       |      |         |         |         |                | 0,58 | 0,23 | 0,10 | 0,35           | 0,13 | 0,18 |
| Gompertz                     | Parámetro    | 5,46          | 5,15           | 0,70          |               | 18,81 | 373,92 | 19,34 | 0,78 | -19,40  | 46,80   | 63,40   | 0,64           | 1,00 | 0,66 | 0,03 | 29,81          | 0,09 |      |
|                              | Error Estnd. | 0,01          | 0,55           | 0,03          |               |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>***  | <2e-16<br>*** |               |       |        |       |      |         |         |         |                | 0,73 | 0,22 | 0,08 | 0,27           | 0,10 | 0,16 |
| Log-Logistic                 | Parámetro    | 5,53          | 46,06          | 3,54          |               | 18,76 | 372,14 | 19,29 | 0,77 | -47,20  | 102,00  | 119,00  | 1,85           | 1,00 | 0,73 | 0,03 | 35,76          | 0,11 |      |
|                              | Error Estnd. | 0,02          | 8,61           | 0,15          |               |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 1,4e-07<br>*** | <2e-16<br>*** |               |       |        |       |      |         |         |         |                | 0,40 | 0,18 | 0,06 | 0,56           | 0,02 | 0,08 |
| Logistic                     | Parámetro    | 4,75          | 8,37           | 0,80          |               | 19,47 | 400,07 | 20,00 | 0,80 | 90,40   | -173,00 | -156,00 | 1,85           | 1,00 | 0,60 | 0,03 | 35,757         | 0,08 |      |
|                              | Error Estnd. | 0,01          | 1,02           | 0,03          |               |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 2,4e-15<br>*** | <2e-16<br>*** |               |       |        |       |      |         |         |         |                | 0,40 | 0,19 | 0,12 | 0,31           | 0,02 | 0,20 |
| Monomolecular                | Parámetro    | 4,76          | 2,80           | 0,61          |               | 19,47 | 400,11 | 20,00 | 0,80 | 82,00   | -156,00 | -139,00 | 1,96           | 1,00 | 0,65 | 0,04 | 37,22          | 0,09 |      |
|                              | Error Estnd. | 0,01          | 0,25           | 0,03          |               |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>***  | <2e-16<br>*** |               |       |        |       |      |         |         |         |                | 0,37 | 0,16 | 0,09 | 0,05           | 0,02 | 0,15 |
| Morgan-Mercer-Flodin         | Parámetro    | 11,22         | 4,05           | 0,22          | 5,73          | 13,49 | 195,34 | 13,98 | 0,55 | -533,00 | 1076,00 | 1097,00 | 3,91           | 0,99 | 1,03 | 0,04 | 33,25          | 0,16 |      |
|                              | Error Estnd. | 0,04          | 0,36           | 6,1e-03       | 0,56          |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>***  | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>*** |       |        |       |      |         |         |         |                | 0,14 | 0,03 | 0,01 | 0,13           | 0,04 | 0,02 |
| Richard's                    | Parámetro    | 6,64          | 7,15           | 149,03        | 218,09        | 17,67 | 330,97 | 18,19 | 0,73 | -189,00 | 389,00  | 409,00  | 0,05           | 0,99 | 0,65 | 0,03 | 37,53          | 0,09 |      |
|                              | Error Estnd. | 0,02          | 1,87           | 6,45          | 17,52         |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** | 1,5e-04<br>*** | <2e-16<br>*** | <2e-16<br>*** |       |        |       |      |         |         |         |                | 0,98 | 0,09 | 0,09 | 0,20           | 0,02 | 0,14 |
| Von Bertalanffy              | Parámetro    | 4,97          |                | 1,00          |               | 19,22 | 390,38 | 19,76 | 0,79 | -27,30  | 60,60   | 73,00   | 9,40           | 0,99 | 0,64 | 0,03 | 48,07          | 0,10 |      |
|                              | Error Estnd. | 0,01          |                | 0,01          |               |       |        |       |      |         |         |         |                |      |      |      |                |      |      |
|                              | Valor p      | <2e-16<br>*** |                | <2e-16<br>*** |               |       |        |       |      |         |         |         | 9,1e-03<br>*** | 0,07 | 0,10 | 0,27 | 6,7e-04<br>*** | 0,13 |      |

Nota: \* representa significancia estadística al 5%; \*\*, al 1%; \*\*\*, al 0,1%.

La curva de crecimiento ya ajustada obtenida con cada modelo, para medir el rendimiento de la palma aceitera en la zona sur de Costa Rica, se muestra en la figura 2. También se proporcionan los pronósticos aceptables para cada modelo no lineal después de la transformación Box-Cox y un promedio de todos los modelos en la tabla 4. Estas predicciones simulan el rendimiento de la palma aceitera en FFB/ha en un periodo de 25 años, asumiendo que en el primer y el segundo año después del establecimiento del cultivo el rendimiento en la producción de FFB es nulo.



**Figura 2.** Curvas de ajuste del rendimiento de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en toneladas de racimos de fruta fresca por hectárea (FFB/ha) para cada modelo no lineal con transformación Box-Cox.

Las predicciones de los modelos son razonables en un periodo de 25 años. Sin embargo, para años posteriores al décimo, todos los modelos tienden a estabilizar el rendimiento. Por ejemplo, en la tabla 4 se observa un aumento con variaciones mínimas en el modelo Logistic después del duodécimo año, con un rendimiento que oscila entre 25,83 y 25,86 t de FFB, mientras que el rendimiento reportado por los productores tiende a disminuir progresivamente (figuras 1 y 2). Este efecto de reducción del rendimiento en edades avanzadas del cultivo no fue correctamente pronosticado por los modelos utilizados.

En Malasia se reportó el máximo potencial de producción registrado y pronosticado con modelos no lineales, que oscila entre 35 y 38 t/ha [10]. Estos son rendimientos representativos de la zona de estudio y varían significativamente respecto de los reportados en esta investigación, en la que se registró y pronosticó un rendimiento máximo que oscilaba en un rango de 23 a 26 t/ha, aproximadamente 32% menor.

Actualmente, en Costa Rica se reporta una productividad anual promedio de 14 a 17 t/ha [4], afectada por la enfermedad de la “flecha seca” y los bajos precios internacionales, que se puede traducir en una menor retribución económica para el pequeño productor y refleja un manejo deficiente del cultivo. Sin embargo, existen fincas donde se ha reportado una productividad de hasta 24 t de FFB/ha.

**Cuadro 4.** Simulación de rendimientos de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) para los modelos no lineales con transformación Box-Cox.

| Edad | Rendimiento (FFB/ha) | Modelo no lineal  |          |              |          |               |                      |           |                 | Media | D.E. | C.V. (%) |
|------|----------------------|-------------------|----------|--------------|----------|---------------|----------------------|-----------|-----------------|-------|------|----------|
|      |                      | Chapman-Richard's | Gompertz | Log-logistic | Logistic | Monomolecular | Morgan-Mercer-Flodin | Richard's | Von Bertalanffy |       |      |          |
| 3    | 9                    | 8,41              | 8,11     | 7,79         | 8,24     | 8,04          | 8,69                 | 8,77      | 6,99            | 8,13  | 0,57 | 6,97     |
| 4    | 13                   | 13,45             | 13,93    | 14,60        | 13,60    | 14,28         | 12,92                | 13,28     | 16,53           | 14,08 | 1,13 | 8,03     |
| 5    | 16                   | 18,25             | 18,83    | 19,42        | 18,65    | 18,95         | 18,72                | 17,62     | 21,77           | 19,03 | 1,23 | 6,45     |
| 6    | 18                   | 21,66             | 22,04    | 22,16        | 22,12    | 21,93         | 22,56                | 25,56     | 23,98           | 22,75 | 1,34 | 5,89     |
| 7    | 20                   | 25,73             | 23,88    | 23,66        | 24,05    | 23,69         | 24,36                | 25,56     | 24,83           | 24,47 | 0,82 | 3,36     |
| 8    | 22                   | 25,73             | 24,87    | 24,50        | 25,02    | 24,69         | 25,15                | 25,56     | 25,15           | 25,08 | 0,42 | 1,66     |
| 9    | 23                   | 25,73             | 25,38    | 25,01        | 25,47    | 25,24         | 25,51                | 25,56     | 25,27           | 25,40 | 0,23 | 0,89     |
| 10   | 23                   | 25,73             | 25,63    | 25,32        | 25,69    | 25,54         | 25,68                | 25,56     | 25,31           | 25,56 | 0,16 | 0,64     |
| 11   | 24                   | 25,73             | 25,76    | 25,52        | 25,78    | 25,71         | 25,77                | 25,56     | 25,33           | 25,65 | 0,16 | 0,63     |
| 12   | 24                   | 25,73             | 25,83    | 25,65        | 25,83    | 25,80         | 25,82                | 25,56     | 25,33           | 25,69 | 0,17 | 0,68     |
| 13   | 24                   | 25,73             | 25,86    | 25,74        | 25,84    | 25,85         | 25,85                | 25,56     | 25,34           | 25,72 | 0,19 | 0,72     |
| 14   | 24                   | 25,73             | 25,87    | 25,81        | 25,85    | 25,87         | 25,87                | 25,56     | 25,34           | 25,74 | 0,19 | 0,75     |
| 15   | 23                   | 25,73             | 25,88    | 25,85        | 25,86    | 25,89         | 25,88                | 25,56     | 25,34           | 25,75 | 0,20 | 0,78     |
| 16   | 23                   | 25,73             | 25,89    | 25,89        | 25,86    | 25,89         | 25,88                | 25,56     | 25,34           | 25,76 | 0,21 | 0,80     |
| 17   | 23                   | 25,73             | 25,89    | 25,92        | 25,86    | 25,90         | 25,89                | 25,56     | 25,34           | 25,76 | 0,21 | 0,81     |
| 18   | 23                   | 25,73             | 25,89    | 25,94        | 25,86    | 25,90         | 25,89                | 25,56     | 25,34           | 25,76 | 0,21 | 0,82     |
| 19   | 22                   | 25,73             | 25,89    | 25,95        | 25,86    | 25,90         | 25,89                | 25,56     | 25,34           | 25,77 | 0,21 | 0,83     |
| 20   | 22                   | 25,73             | 25,89    | 25,96        | 25,86    | 25,90         | 25,89                | 25,56     | 25,34           | 25,77 | 0,22 | 0,84     |
| 21   | 22                   | 25,73             | 25,89    | 25,97        | 25,86    | 25,90         | 25,89                | 25,56     | 25,34           | 25,77 | 0,22 | 0,84     |
| 22   | 21                   | 25,73             | 25,89    | 25,98        | 25,86    | 25,90         | 25,89                | 25,56     | 25,34           | 25,77 | 0,22 | 0,85     |
| 23   | 21                   | 25,73             | 25,89    | 25,99        | 25,86    | 25,90         | 25,90                | 25,56     | 25,34           | 25,77 | 0,22 | 0,85     |
| 24   | 21                   | 25,73             | 25,89    | 25,99        | 25,86    | 25,90         | 25,90                | 25,56     | 25,34           | 25,77 | 0,22 | 0,85     |
| 25   | 21                   | 25,73             | 25,89    | 26,00        | 25,86    | 25,90         | 25,90                | 25,56     | 25,34           | 25,77 | 0,22 | 0,86     |

Nota: D.E.= Desviación estándar; C.V.= Coeficiente de variación.

En todos los modelos no lineales utilizados inicialmente, la hipótesis de normalidad de los residuos fue rechazada debido a la posible presencia de sesgo en la respuesta de los agricultores. La ausencia de normalidad se logró corregir empleando la transformación Box-Cox, con un análisis previo para la selección del factor “lambda” [23]. No obstante, los parámetros resultantes luego del ajuste con Box-Cox no son comparables a los parámetros reportados en otras investigaciones [10]. Además, no se conoce ningún otro autor que haya aplicado la transformación Box-Cox en modelos de curvas de rendimiento de la palma aceitera, de la misma manera que se realizó en esta propuesta (cuadro 3).

## Conclusiones

Todos los modelos no lineales utilizados generaron un patrón de pronóstico aceptable y se consideraron aptos para pronosticar el rendimiento anual de palma aceitera en la zona sur de Costa Rica, a pesar del extenso ciclo de vida característico de los cultivos perennes.

La transformación Box-Cox propició una mejora generalizada en los criterios estadísticos de eficiencia del pronóstico y se consideró idónea para reducir los problemas de normalidad

en el pronóstico de los residuos. Después de aplicar la transformación Box-Cox, el modelo Morgan-Mercer-Flodin probó ser el de mayor eficiencia de pronóstico, seguido por los modelos Richard's, Gompertz, Log-logistic y Logistic.

Sin embargo, con la intención de mejorar los ajustes del pronóstico en la modelación del rendimiento de la palma aceitera y otros cultivos perennes importantes para el sector agrícola de Costa Rica (el cultivo de café, por ejemplo), es importante obtener de los productores información más exacta para reducir el sesgo estadístico. La importancia de este factor se dedujo del hecho que los productores indicaran que las plantaciones de palma aceitera se renovaban periódicamente, pero realizado el estudio, se concluyó que las renovaciones podrían no ser las óptimas, debido a que todos los modelos no lineales tendieron a estabilizar la predicción del rendimiento en edades avanzadas de la plantación, mientras que el rendimiento reportado por los productores tendió a disminuir progresivamente.

Para futuras investigaciones se considera oportuno realizar un análisis costo-beneficio para determinar el momento óptimo para la renovación del cultivo de palma aceitera, con el fin de proveer de conocimientos al productor y al sector agrícola de Costa Rica.

## Referencias

- [1] T. Mielke, «Global price outlook of palm oil and other vegetable oils». ISTA Mielke GmbH, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://www.oilworld.biz/t/publications/monthly>.
- [2] A. González-Cárdenas, «La agroindustria de la palma de aceite en América», *Rev. Palmas*, vol. 37, n.º 2, pp. 215-228, 2016.
- [3] INEC, «VI Censo Nacional Agropecuario. Resultados generales». INEC, 2015 [En línea]. Disponible en: <http://www.inec.go.cr/censos/censo-agropecuario-2014>.
- [4] S. Mora e Y. Quirós, *Boletín Estadístico Agropecuario N.º29: Serie Cronológica 2015-2018*, SEPSA, San José, Costa Rica, 29, 2019 [En línea]. Disponible en: <http://www.sepsa.go.cr/productos.html>.
- [5] M. Mosquera y E. García, «Impacto social de la agroindustria de palma de aceite», *Rev. Palmas*, vol. 26, n.º 2, pp. 11-19, 2005.
- [6] B. Algieri, «Price volatility, speculation and excessive speculation in commodity markets: Sheep or shepherd behaviour?», *Econstor*, n.º 166, pp. 1-37, 2012.
- [7] T. Correa, *Palma aceitera: entre la «flecha seca» y la variación de precios internacionales*. San José, Costa Rica: INFOCOOP, 2015.
- [8] G. A. Torres *et al.*, «Bur rot caused by *Phytophthora palmivora*: A destructive emerging disease of oil palm,» *Phytopathology*, n.º 106, pp. 320-329, 2016. doi: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-15-0243-RVW>.
- [9] CANAPALMA, «Precio de fruta de palma aceitera: fruta entregada», *Boletín*, diciembre 2019, 2019 [En línea]. Disponible en: <http://www.canapalma.cr/>.
- [10] A. Khamis *et al.*, «Nonlinear growth models for modeling oil palm yield growth,» *Journal Math. Stat.*, vol. 85, pp. 84-90, 2005. doi: <https://doi.org/10.3844/jmssp.2005.225.233>.
- [11] F. Köhn *et al.*, «Modeling the growth of the Goettingen minipig,» *J. Anim. Sci.*, vol. 85, pp. 84-90, 2007. doi: <https://doi.org/10.2527/jas.2006-271>.
- [12] A. Sabbioni *et al.*, «Effect of sex and season of birth on Gompertz growth curve parameters in "Nero di Parma" pigs,» *J. Anim. Sci.*, vol. 8, n.º 4, pp. 719-729, 2009. doi: <https://doi.org/10.4081/ijas.2009.719>.
- [13] J. A. Monte *et al.*, «Growth analysis and yield of tomato crop under different irrigation depths,» *Rev. Bras. Eng. Agríc. E. Ambient.*, vol. 17, n.º 9, pp. 926-93, 2013. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000900003>.
- [14] Prajneshu and K. P. Chandran, «Computation of compound growth rates in agriculture: Revisited,» *Agric. Econ. Res. Rev.*, vol. 18, pp. 317-324, 2005. doi: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.58480>.
- [15] A. Rajarathinam and B. Vinoth, «Statistical modeling for wheat (*Triticum aestivum*) crop production,» *Int. J. Stat. Appl.*, vol. 2, n.º 4, pp. 40-46, 2012. doi: <https://doi.org/10.5923/j.statistics.20120204.03>.
- [16] S. Panwar *et al.*, «Forecasting of growth rates of wheat yield of Uttar Pradesh through non-linear growth models,» *Indian J. Agrocultural Sci.*, vol. 84, n.º 7, pp. 856-859, 2014.



- [17] S. Pal and D. Mazumdar, «Forecasting groundnut production of India using nonlinear growth models,» *J. Crop Weed*, vol. 11, n.º Special Issue, pp. 67-70, 2015.
- [18] R. H. V. Corley, J. J. Hardon, and G. Y. Tan, «Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) I. Estimation of growth parameters and application in breeding,» *Euphytica*, vol. 20, pp. 307-315, 1971. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00056093>.
- [19] L. S. Woittiez *et al.*, «Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors,» *Eur. J. Agron.*, vol. 83, pp. 57-77, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>.
- [20] L. von Bertalanffy, «A quantitative theory of organic growth (Inquiries on growth laws, II),» *Hum. Biol.*, vol. 10, n.º 2, pp. 181-213, 1938.
- [21] R. Juárez-Romero y R. Searcy-Bernal, «Von Bertalanffy growth model for the pismo clam (*Tivela stultorum*), based on age-length data from commercial catches,» *Sci. Mar.*, vol. 20, n.º 1, pp. 81-92, 1994. doi: <https://doi.org/10.7773/cm.v20i1.952>.
- [22] M. M. Tariq *et al.*, «Comparisson of non-linear functions to describe the growth in mengali sheep breed of Balochistan,» *Pak. J. Zool.*, vol. 45, n.º 3, pp. 661-665, 2013.
- [23] G. E. Box and D. R. Cox, «An analysis of transformations,» *J. R. Stat. Soc.*, vol. 26, n.º 2, pp. 211-252, 1964.

# Factores ergonómicos de riesgo para los trabajadores agrícolas, en la zona norte de Cartago, Costa Rica

## Ergonomic factors of risk for agricultural workers in the northern area of Cartago, Costa Rica

Carmen E. Madriz-Quirós<sup>1</sup>, Olga Sánchez-Brenes<sup>2</sup>

---

*Fecha de recepción: 23 de octubre de 2019*  
*Fecha de aprobación: 27 de marzo de 2020*

Madriz-Quirós, C. E; Sánchez-Brenes, O. Factores ergonómicos de riesgo para los trabajadores agrícolas, en la zona norte de Cartago, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 127-142.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4575>



- 1 Profesora de la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial e investigadora del Laboratorio de Ergonomía, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Correo electrónico: [cmadriz@tec.ac.cr](mailto:cmadriz@tec.ac.cr)
- 2 Profesora de la Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial e investigadora del Laboratorio de Ergonomía, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Correo electrónico: [osanchez@tec.ac.cr](mailto:osanchez@tec.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-4718-8552>

## Palabras clave

Ergonomía; biomecánica; consumo energético; agricultura.

## Resumen

La agricultura es una de las actividades de mayor exposición a prácticas no ergonómicas en todas las labores de campo. Lesiones musculoesqueléticas frecuentemente afectan a esta población predominantemente de varones. Este estudio presenta y cuantifica el potencial de problemas relacionados con estas labores, donde las posturas incómodas y las numerosas repeticiones, así como el manejo de cargas y las largas jornadas de trabajo son la causa. La rotación de siembras requiere de alta exposición a ese tipo de prácticas, tanto en zanahoria y papa como en lechuga, que se mantiene durante todo año. Las zonas corporales más lesionadas son la espalda baja, las rodillas y los hombros, y en segundo orden, manos y muñecas. La intervención con nuevas herramientas y organización del trabajo es indispensable ante estos resultados.

## Keywords

Ergonomics; biomechanics; oxygen consumption; agriculture.

## Abstract

Agriculture is one of the productive activities that involves a lot of ergonomic exposure. Musculoskeletal injuries are frequently developed among male population who are high involve in this activity. This study shows and quantifies the potential of ergonomic risks in agriculture tasks where awkward postures, high repetitions, load handling, and long working hours affect the health of farm workers. The planting rotation conducts to high ergonomic exposure in carrots, potatoes and lettuces farming, which increases the risk of injuries, mainly in bodily areas such as the lower back, knees and shoulders, and in second order, in hands and wrists. These results demand intervention with new tools and work organization.

## Introducción

El objetivo de este estudio en su fase I fue la identificación de factores de riesgo presentes en labores agrícolas, específicamente en la siembra y postcosecha de zanahoria, papa y lechuga, en la zona norte de Cartago, zona tradicionalmente agrícola en Costa Rica. El Instituto Nacional de Seguros de Costa Rica en el 2007 [1] reportó que la tasa de incapacidades por enfermedad en el área de la agricultura fue de 6,48 días. Las cuatro causas más frecuentes de incapacidad son los problemas respiratorios (100 000 días), los problemas posturales relacionados con dolor de espalda (60 000 días), las infecciones intestinales (45 000 días) y los desórdenes del comportamiento (35 000 días), los cuales se pueden deber a la alta carga de trabajo en este sector o a la inadecuada organización de las tareas. De acuerdo al VI Censo Nacional Agropecuario del 2015 [2], la provincia de Cartago es la que mayor producción de hortalizas tiene en Costa Rica, con una cobertura del 58% del área destinada a esta labor en el país. En general, se han identificado varios factores de riesgo en la horticultura, muy generalizados al resto del mundo. Los riesgos de mayor importancia son los mecánicos, asociados al uso de herramientas manuales, maquinaria y equipos agrícolas, que le originan al trabajador una carga laboral que se ve incrementada por los demás factores de riesgo, especialmente la carga física-dinámica, la topografía irregular del terreno y la presencia de zanjas y hoyos, las condiciones climáticas adversas, los riesgos biológicos, la carga mental, sin dejar de lado las deficientes

condiciones higiénicas y sanitarias y los riesgos derivados del ambiente y del ecosistema. Los daños a la salud de los trabajadores pueden ser lesiones musculoesqueléticas, fatiga física y lesiones por esfuerzos repetitivos.

## Teoría

En tiempos modernos, la agricultura sigue teniendo gran importancia como principal actividad para muchos países alrededor del mundo. El Banco Mundial [3] reportó que la agricultura representaba más de un tercio de las exportaciones para casi 50 países en vías de desarrollo. También en los países desarrollados se ha evidenciado este crecimiento. En Estados Unidos el censo del 2002 en agricultura, mostró que esta actividad era una de las mayores del país [7].

El National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH, (Instituto Nacional para la Seguridad y la Salud Ocupacional) de los Estados Unidos [4] reportó que aproximadamente 1 859 000 de los trabajadores eran empleados a tiempo completo en labores agrícolas en los Estados Unidos. Así también señaló la agricultura como una de las actividades de mayor riesgo, tanto por lesiones fatales como no fatales. Como ejemplo, entre 1988 y el 2002 se presentaron 10 fatalidades en el área de floricultura y 131 en el área de hortalizas y jardines, en los Estados Unidos [5]. En América Latina el 19% de la fuerza de trabajo de la región está relacionada con la agricultura. Para este sector, no existe una apropiada relación entre seguridad y leyes, lo que se traduce en pérdida de la producción, gastos medicamentos e incapacidades para los trabajadores [6]. El censo de agricultura mostró que alrededor de 25 millones de personas realizan actividades relacionadas con la agricultura en la Comunidad Europea. Este incluyó tanto a familias enteras como a personas que no pertenecían al núcleo familiar. Curiosamente se reportó que los porcentajes de la fuerza de trabajo que no pertenecía al grupo familiar era en República Checa del 75%; en Eslovenia, de un 72%; en Francia, del 56%, y en Dinamarca, de un 43%. En varios de los Estados miembros de la Comunidad Europea la fuerza de trabajo familiar representa el 80% de la fuerza laboral en agricultura.

## Metodología

Este estudio se desarrolló en la zona norte de Cartago, donde el cultivo de hortalizas y tubérculos como la papa, la zanahoria y la lechuga es predominante. Se evaluó en total una población agrícola de 60 trabajadores de campo y 40 trabajadores de postcosecha, en sus diferentes labores rutinarias. Se aplicó una encuesta sobre molestias físicas relacionadas con las condiciones en el campo. Se desarrollaron entrevistas con los trabajadores y supervisores en el sitio de trabajo para lograr la identificación de los problemas existentes por medio de las señales o los signos de alerta en la salud de los trabajadores y su relación con la organización del trabajo.

Esta fase de observación se desarrolló mediante el levantamiento de un mapeo de todas las operaciones realizadas durante la cosecha y la postcosecha: transportes, demoras, inspecciones y almacenamientos. Se realizó un análisis posterior mediante la ecuación de levantamiento de NIOSH un análisis biomecánico para predecir las cargas en los diferentes segmentos del cuerpo y un estudio de consumo de oxígeno, en el que se obtuvo información antropométrica de los participantes. El *set* antropométrico sirvió para la toma de los datos que se procesaron en una base de datos, para el análisis de percentiles, medias y desviaciones de cada medición.

También se midió el consumo de oxígeno en las labores determinadas de cosecha y postcosecha de tres cultivos (zanahoria, papa y lechuga), identificadas como críticas en cuanto al riesgo por la ausencia de condiciones ergonómicas. Para esto se realizó una medición de

10 ciclos de operación como menos. Para asegurar el análisis estadístico se realizaron como mínimo 3 evaluaciones con diferentes trabajadores de una misma labor.

## Análisis estadístico de los datos

1. La selección de la muestra para la aplicación de la encuesta sobre disconformidad y de los formatos de evaluación del NIOSH se realizó con una estimación del 50% de prevalencia del parámetro por evaluar (exceso de capacidad física), con un error de 0,175 en el valor estimado de consumo de oxígeno y con un 95% de confianza. Se obtuvo una muestra meta de veintidós trabajadores de campo, siete por cada cultivo analizado. Los trabajadores fueron seleccionados aleatoriamente por medio de un muestreo estratificado según el puesto de trabajo desempeñado.
2. En la toma de datos para la medición del consumo de oxígeno, se les preguntó primero a los siete trabajadores de cada cultivo sobre las labores de campo que consideraban críticas. Estos trabajadores debían haber respondido la encuesta sobre molestias inicialmente. Los que estaban de acuerdo en participar llenaban un cuestionario médico. El propósito de este cuestionario era seleccionar a los participantes, para quienes era requerido no tener condiciones médicas previas que pudieran agudizarse con el esfuerzo físico exigido en el estudio.
3. Los datos recolectados fueron procesados utilizando el software estadístico Minitab versión 15. La normalidad de las mediciones antropométricas fue evaluada con la prueba de Shapiro Wilks, con un 0,05 de significancia. Se realizó un análisis de correlación entre las variables antropométricas y el nivel de consumo de oxígeno obtenido. Por medio del análisis de regresión, también se midió la misma correlación.
4. Para evaluar las estaciones de trabajo de manera integral, se usó la aplicación desarrollada por el Instituto de Biomecánica de Valencia, Ergo/IBV, para la evaluación de riesgos por falta de condiciones ergonómicas, programa informático que permite evaluar estos riesgos en diferentes ámbitos de aplicación. Dispone de vídeo integrado para el análisis de las tareas y genera informes detallados, así como recomendaciones para reducir los riesgos detectados en la evaluación.

## Resultados y discusión

### Encuesta sobre molestias físicas en campo

El análisis indicó que el 87% de los trabajadores encuestados fueron hombres, contra un 13% de mujeres. De las molestias físicas de los trabajadores en el campo, el dolor en la espalda baja fue la de mayor incidencia, con un 62%, que superó en más de un 30% otras con ubicaciones como la espalda alta, la rodilla izquierda y la muñeca y mano izquierda, con un 29%, un 25% y un 23%, respectivamente. Del 62% de los trabajadores que afirmaron padecer de dolores en su espalda baja, el 48% afirmó que el dolor era poco; el 33%, moderado, y el 19%, que era demasiado fuerte. Estos resultados fueron porcentualmente similares a los de dolor en la espalda alta y otras partes que seguían a la espalda baja en incidencia. Al preguntarles a los trabajadores si el dolor, indistintamente de su ubicación, afectaba la capacidad para ejercer su ocupación, en su mayoría consideraron que no la afectaba. El porcentaje de los trabajadores afectados por el dolor, representados en la figura 1, por rangos de edad, oscila entre el 78% y el 100% de los encuestados. Menos del 20% de los trabajadores en cualquiera de todos los rangos consideraron que el dolor afectaba poco o mucho su capacidad para desempeñar sus obligaciones agrícolas.

En la figura 1, precisamente se comparan las ubicaciones de las molestias según la edad de los individuos. Esta permite observar que la mayor incidencia de dolor es la del rango de los 30 a los 50 años; esta población fue la más afectada, pues está en edad productiva, caso diferente al del rango de los 12 a los 20 años, de jóvenes en pleno desarrollo y que por ende, no se ven tan afectados por dolores de diversa frecuencia.



**Figura 1.** Área de cuerpo afectado según la edad de los trabajadores.

Del 62% de los encuestados que sufrían dolores en su espalda baja, un 29% correspondió a individuos entre los 30 y los 50 años, seguido por un 17%, correspondiente a los que se encontraban entre los 20 y los 30 años, y por último, un 6%, a los que se ubicaban entre los 12 y los 20 años.

### Consumo de oxígeno

En el proceso de siembra y cosecha de la papa se identificaron tres diferentes actividades: siembra, recolección y extracción. La actividad donde el trabajador recolecta la papa después que esta es removida por un medio mecánico o tractor reportó un consumo energético promedio de 378,1 kilocalorías por hora, para un consumo de 3,44 litros por minuto, lo que implica que el trabajador se encuentra a un 37% de su máxima capacidad aeróbica, sobrepasando así el 33% recomendado para labores de 8 horas de trabajo. Se recomienda que por cada hora de trabajo se tenga un descanso de 9,8 minutos, para poder dar tiempo a la recuperación del trabajador. En la siembra de la papa, el consumo es de 436,9 kilocalorías por hora, para un porcentaje del 41% del máximo de la capacidad aeróbica. En este caso se recomienda que, por cada hora de trabajo, se tomen aproximadamente 20,6 minutos de descanso. Y en el caso del trabajador que saca la papa utilizando el garabato, el consumo es de 471,68 kilocalorías por hora, equivalente a un 59% de su máxima capacidad aeróbica, lo que la constituye en la tarea de mayor consumo de energía para los trabajadores.

En la recolección de la zanahoria el consumo energético reportado es de 304,08 kilocalorías por hora, para un 39% de su máxima capacidad aeróbica. En el proceso de siembra, en el cual se utiliza una herramienta que permite mantener la espalda con una inclinación no mayor de 30 grados, el consumo es de 267,5 kilocalorías por hora, para un 24% de su máxima capacidad aeróbica.

El esfuerzo de acuerdo con el nivel inhalado de oxígeno fue categorizado por rangos de acuerdo con la probabilidad de sufrir alguna lesión muscular, dolor o exceso de fatiga [8]. Así, las actividades analizadas se clasifican de acuerdo al esfuerzo requerido de la siguiente forma, como se muestra en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** Consumo energético de tareas de campo.

| Tarea                    | Consumo de oxígeno (l/min) | Riesgo                |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Recolección de papa      | 1,26                       | Pesado (alto)         |
| Siembra de papa          | 1,46                       | Muy pesado (muy alto) |
| Sacar papa con garabato  | 1,57                       | Muy pesado (muy alto) |
| Recolección de zanahoria | 1,01                       | Moderado              |
| Siembra de zanahoria     | 0,89                       | Moderado              |

Las variables antropométricas estudiadas correspondieron a un total de 54 trabajadores, como lo indica el cuadro 2.

**Cuadro 2.** Medias antropométricas de agricultores de la zona norte de Cartago.

| Medida             | Percentil (centímetros) |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 5                       | 10    | 25    | 50    | 75    | 90    | 95    |
| Estatura           | 160,7                   | 162,3 | 164,3 | 168,0 | 171,2 | 174,4 | 176,7 |
| Altura de codo     | 99,4                    | 101,3 | 103,0 | 105,0 | 107,7 | 109,0 | 111,0 |
| Alcance puño       | 65,3                    | 67,2  | 70,0  | 72,8  | 75,5  | 78,4  | 79,4  |
| Distancia de codos | 34,4                    | 35,8  | 38,0  | 40,8  | 45,3  | 48,3  | 49,7  |
| Largo mano         | 17,5                    | 17,8  | 18,2  | 18,8  | 19,5  | 20,0  | 20,2  |
| Ancho mano         | 8,5                     | 8,5   | 9,0   | 9,5   | 86,0  | 90,0  | 96,0  |

No se detectó ninguna correlación entre las variables antropométricas anteriores y el nivel de consumo de oxígeno de los trabajadores de acuerdo al análisis estadístico, para un valor de  $p$  de 0,123. Así tampoco existe una relación entre el nivel de consumo de oxígeno y la tarea realizada, de acuerdo al análisis de varianza de nivel (ANOVA), para un valor de  $p$  de 0,46.



**Figura 2.** Posición en el cultivo de lechuga.

### Análisis postural: Cultivo de lechuga

Durante el proceso de siembra el agricultor mantiene flexionada su espalda más de 90 grados, en un 80% del tiempo de la labor; sin embargo, en la figura 2 se aprecia el movimiento con mayor flexión de espalda, que puede llegar a un ángulo de 100° al colocar cada planta en el terreno.

Las repeticiones realizadas con los brazos durante la tarea de siembra son 31 veces por minuto; esto junto con la postura agachado permite clasificar las actividades por nivel de riesgo, como se muestra en el cuadro 3.

**Cuadro 3.** Resumen de riesgo de siembra de lechuga.

| Actividad                         | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación           |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------|
| Tomar almácigo de la bandeja.     | Cuello y hombros | IV              | Intervención inmediata. |
| Introducir almácigo en la tierra. | Cuello y hombros | IV              | Intervención inmediata. |
|                                   | Mano y muñeca    | II              | Puede mejorarse.        |

### Recolección de lechugas



**Figura 3.** Postura en recolección de lechuga como con los brazos.

Para recolectar las lechugas de la tierra, el trabajador flexiona la columna y adopta un ángulo aproximado de 80 grados; en esta actividad utiliza un cuchillo que facilita el corte del tallo. Las manos y las muñecas realizan movimientos giratorios con desviaciones, a razón de 9 repeticiones por minuto, como se ve en la figura 3, con una frecuencia de 5 segundos por lechuga. Una vez realizado el corte, el trabajador quita las hojas dañadas de la lechuga, para lo que realiza 5 repeticiones por minuto, tanto con las manos



La frecuencia de la actividad de corte es de 10 lechugas por minuto. El detalle de estas actividades y su nivel de riesgo se muestran en el cuadro 4.

**Cuadro 4.** Evaluación de las actividades de recolección de lechuga.

| Actividad                                | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación                        |
|--|------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Cortar la lechuga a nivel del suelo.     | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible.   |
|  | Mano y muñeca    | III             | Intervenir tan pronto sea posible.   |
| Quitar las hojas dañadas.                | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible.   |
|  | Mano y muñeca    | I               | Situación ergonómicamente aceptable. |
| Entregar la lechuga para almacenamiento. | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible.   |
|  | Mano y muñeca    | I               | Situación ergonómicamente aceptable. |

## Cultivo de papa

### Siembra

El proceso inicia con la preparación del terreno de manera que sea apto para el cultivo de papa, se siembra en surcos. Los tubérculos semilla se colocan en el fondo del surco y se cubren con una capa de tierra de 7 a 10 cm de alto para formar un lomillo, el cual se levanta entre 20 y 30 cm sobre el nivel del suelo, cuando se realiza la siembra. Los riegos asociados se muestran en el cuadro 5.

**Cuadro 5.** Riesgos en la siembra de papa.

| Actividad         | Nivel de riesgo | Zona Afectada    | Recomendación  |
|-------------------|-----------------|------------------|--|
| Sembrar papa      | I               | -                | Posturas que se consideran normales, sin riesgo de lesiones musculoesqueléticas. No es necesario intervenir. |
| Remover la tierra | IV              | Cuello y hombros | Intervenir inmediatamente.   |
|                   | I               | Mano y muñeca    | Ergonómicamente aceptable.   |

### Recolección



**Figura 4.** Postura en recolección de la papa.



**Figura 5.** Postura de 90 grados de inclinación.

Para realizar el proceso de extracción y recolección de la papa, el trabajador mantiene inclinada su espalda, como se ve en las figuras 4 y 5, en un ángulo de 90 grados durante 5 minutos, tiempo aproximado para llenar un canasto, con pausas de 40 segundos para depositar el contenido del canasto en los sacos, que tienen un peso final de 45 a 50 kilogramos.

A continuación se presentan los resultados relacionados con los s detectados, en los cuadros 7, 8, 9 ,10, 11 y 12, respectivamente. Seguidamente se tiene el resumen de riesgos posturales y área de cuerpo afectada en esta labor, ver cuadro 6.

**Cuadro 6.** Riesgos posturales.

| Actividad                        | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación                      |
|----------------------------------|------------------|-----------------|------------------------------------|
| Remover la tierra                | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
|                                  | Mano y muñeca    | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
| Extraer la papa                  | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
|                                  | Mano y muñeca    | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
| Depositar papas en canasto       | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
|                                  | Mano y muñeca    | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
| Depositar contenido en sacos     | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
|                                  | Mano y muñeca    | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
| Extraer la papa (tarea completa) | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
|                                  | Mano y muñeca    | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
| Depositar papas en canasto       | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
|                                  | Mano y muñeca    | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
| Depositar contenido en sacos     | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |
|                                  | Mano y muñeca    | III             | Intervenir tan pronto sea posible. |

Se puede resumir el riesgo postural de estas tareas a continuación, en el cuadro 7.

**Cuadro 7.** Resumen del riesgo postural.

| Actividad                 | Nivel de riesgo | Recomendación   |
|---------------------------|-----------------|---|
| Extraer la papa.          | III             | Posturas con riesgo alto de lesiones musculoesqueléticas. Intervenir tan pronto sea posible.        |
| Depositar papas en sacos. | IV              | Posturas con riesgo extremo de lesiones musculoesqueléticas. Se requiere intervenir inmediatamente. |

### Levantamiento y traslado de sacos

En esta actividad, un agricultor se encarga de trasladar los sacos a un camión que se ubica a una distancia aproximada de 8 metros de la zona donde están los sacos. Luego de ser colocados todos los sacos en el camión, se trasladan a la planta donde se procede a la descarga de los sacos, los cuales se colocan en tarimas. Se descargan 18 sacos por tarima, a la espera de comenzar el proceso de lavado.

Se aplicó el índice de levantamiento del NIOSH para medir el nivel de riesgo en esta actividad. Los resultados se presentan en el cuadro 8.

**Cuadro 8.** Índices de levantamiento de NIOSH.

| Actividad                         | Índice NIOSH/ ergoIBV | Riesgo      |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------|
| Levantamiento y traslado de sacos | 3,98                  | Inaceptable |
| Descarga de sacos del camión      | 3,07                  | Inaceptable |
| Colocación de sacos en tarimas    | 3,88                  | Inaceptable |

El límite de peso recomendado por el software Ergo IBV es de 17 kilogramos, por lo que la persona levanta más del doble de la carga permitida.

### Lavado y empaque

Las papas, al igual que las zanahorias, pasan por tres tanques de lavado. Un operador se encarga de facilitar el traslado de las papas de un tanque a otro con la ayuda de una espátula de madera. El proceso de lavado tiene una duración de 11 minutos aproximadamente; luego las papas son depositadas en una banda transportadora donde varios colaboradores se encargan de la selección, dependiendo del tamaño. Todas las papas se colocan en cajas de plástico y se almacenan antes de ser trasladadas a la zona de empaque.

El nivel de riesgo postural en esta actividad se valoró y los resultados se muestran en los cuadros 9 y 10.

**Cuadro 9.** Resultados de riesgo postural.

| Actividad                                  | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación   |
|--|------------------|-----------------|---|
| Abrir sacos                                | Cuello y hombros | IV              | Intervenir inmediatamente.  |
|  | Mano y muñeca    | II              | Puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |
| Depositar contenido en el tanque de lavado | Cuello y hombros | IV              | Intervenir inmediatamente   |
|  | Mano y muñeca    | II              | Puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |

Al llegar a la zona de empaque, un colaborador se encarga de colocar las papas en la mesa de empaque, donde varios operarios realizan el llenado de las bolsas. Una vez que están completas, otro colaborador se encarga del sellado y se colocan en sacos; de nuevo un operador se encarga de pesarlas tomando en cuenta que cada saco debe pesar entre 45 y 50 kilogramos.

**Cuadro 10.** Riesgos posturales en segunda fase de trabajo.

| Actividad           | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación   |
|---------------------|------------------|-----------------|---|
| Selección de papas  | Cuello y hombros | IV              | Intervenir inmediatamente.  |
|                     | Mano y muñeca    | I               | Situación ergonómicamente aceptable.                                  |
| Colocación en sacos | Cuello y hombros | II              | Puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |
|                     | Mano y muñeca    | II              | Puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |

## Pesaje de sacos

Una vez listos los sacos con papas, dos trabajadores se encargan de trasladar cada uno sucesivamente a la báscula donde corroboran el peso, que tiene que estar entre 45 y 50 kilogramos. Concluido este proceso colocan el saco en un carrito para su posterior almacenaje.

Esta tarea se evaluó con el *software* Ergo IBV y se obtuvieron los resultados mostrados en el cuadro 11.

**Cuadro 11.** Índices de levantamiento de NIOSH.

| Actividad                     | Índice NIOSH | Recomendación      |
|-------------------------------|--------------|--------------------|
| Levantamiento de sacos        | 2,72         | Riesgo inaceptable |
| Traslado de sacos             | 2,50         | Riesgo inaceptable |
| Descarga de sacos en carritos | 3,40         | Riesgo inaceptable |

La colocación de los sacos en la báscula tiene un valor del índice NIOSH de 2,54 lo que indica que el trabajador se encuentra bajo un riesgo inaceptable. Luego los sacos se almacenan antes de ser acomodados en el camión.



**Figura 6.** Postura en cultivo de zanahoria.

## Cultivo de zanahoria

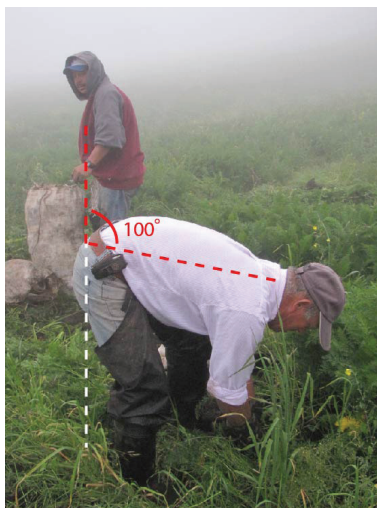
### Siembra

El proceso inicia con la preparación del terreno, de manera que sea apto para la siembra de zanahorias. Una vez que la tierra se encuentra lista, se reparten las semillas directamente sobre el suelo; se siembran aproximadamente a un centímetro de profundidad en hileras separadas a una distancia de unos 15 centímetros una de otra. La herramienta utilizada obliga al trabajador a inclinar su cuello, principalmente, aproximadamente 62 grados, como lo indica la figura 6, postura que mantiene durante el 60% de la jornada de trabajo. El cuadro 12 resume los riesgos en la siembra.

**Cuadro 12.** Riesgos posturales en la siembra.

| Actividad                        | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación  |
|----------------------------------|------------------|-----------------|--|
| Depositar semillas en la tierra. | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente                                    |
|                                  | Mano y muñeca    | II              | Situación que puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata |

Recolección



**Figura 7.** Recolección.

El primer paso en el proceso de recolección es la extracción de la zanahoria del suelo con un de torsión de la muñeca y aplicando una fuerza de halado para extraerla. Una vez que se tiene un número de zanahorias considerable, el trabajador las introduce en el saco. El llenado de un saco tiene una duración aproximada de 10 minutos y como término, un peso entre los 45 y los 50 kilos, como se ve en la figura 7. Esta actividad se realiza bajo un riesgo muy alto y debe ser intervenida inmediatamente.

En el cuadro 13, se muestran los niveles de riesgo en la actividad.

**Cuadro 13.** Riesgos en la recolección.

| Actividad                        | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación   |
|----------------------------------|------------------|-----------------|---|
| Extraer zanahorias de la tierra. | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|                                  | Mano y muñeca    | II              | Situación que puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |
| Remover follaje.                 | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible.  |
|                                  | Mano y muñeca    | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
| Colocar zanahorias en sacos.     | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|                                  | Mano y muñeca    | II              | No es necesario intervenir de manera inmediata.                                     |

Lavado y selección

Una vez que las zanahorias llegan a la planta, un colaborador se encarga de la descarga de los sacos en tarimas para que sean llevados a la zona de lavado. La colocación de zanahorias en el tanque de lavado es otra de las tareas que presenta factores de riesgo; la descarga de sacos tiene una duración aproximada de 30 segundos/saco; en ocasiones el colaborador debe subir a la mesa de selección para poder alcanzar los sacos que se encuentran en la parte superior. Para esta tarea, el índice de levantamiento NIOSH fue de 3,04, lo cual la clasifica como una tarea de riesgo inaceptable y la intervención es necesaria. En el cuadro 14, se muestran los resultados de esta evaluación.

**Cuadro 14.** Riesgos en la recolección y selección de zanahoria.

| Actividad                                | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación   |
|--|------------------|-----------------|---|
| Lavado de zanahorias                     | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | II              | Situación que puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |
| Selección de zanahorias                  | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | I               | Situación ergonómicamente aceptable.  |
| Acomodo de zanahorias                    | Cuello y hombros | III             | Intervenir tan pronto sea posible.  |
|  | Mano y muñeca    | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
| Lavado de zanahorias                     | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | II              | Situación que puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |
| Selección de zanahorias (tarea completa) | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | I               | Situación ergonómicamente aceptable.  |

### Empaque

Al llegar a la zona de empaque, un colaborador se encarga de colocar las zanahorias en la mesa de empaque, donde varios operarios las empaquetan. En cada bolsa se colocan 4 zanahorias; una vez que las bolsas están completas se sellan y se colocan en sacos; de nuevo un operador se encarga de pesarlas, tomando en cuenta que cada saco lleno debe pesar entre 45 y 50 kilogramos. En esta operación, la extensión de mano, hombro y espalda es predominante para lograr alcanzar las zanahorias de la mesa y depositarlas en las bolsas de empaque.

El pesaje de los sacos se evaluó, de igual manera, con el *software* Ergo IBV, y se obtuvo un peso recomendado de 20 kilos, así como los resultados mostrados en el cuadro 15. Por su parte, en el cuadro 16, se muestra el análisis de las diferentes operaciones y su nivel de riesgo postural.

**Cuadro 15.** Índices de levantamiento NIOSH.

| Actividad                      | Índice NIOSH | Situaciones        |
|--------------------------------|--------------|--------------------|
| Tomar saco de mesa de empaque. | 3,58         | Riesgo inaceptable |
| Trasladar saco a báscula.      | 2,50         | Riesgo inaceptable |
| Colocar saco en tarimas.       | 2,94         | Riesgo inaceptable |

**Cuadro 16.** Riesgos en el empaque y pesado.

| Actividad                              | Zona afectada    | Nivel de riesgo | Recomendación   |
|--|------------------|-----------------|---|
| Colocar en bolsas de empaque.          | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | I               | Situación de trabajo ergonómicamente aceptable.                                     |
| Ubicar bolsas en mesa de empaque.      | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | II              | Situación que puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |
| Distribuir bolsas en mesa de empaque.  | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | III             | Situación que implica intervenir tan pronto sea posible.                            |
| Sellar bolsas.                         | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | II              | Situación que puede mejorarse, pero no es necesario intervenir de manera inmediata. |
| Empacar zanahorias.<br>(tarea general) | Cuello y hombros | IV              | Situación que implica intervenir inmediatamente.                                    |
|  | Mano y muñeca    | III             | Situación que implica intervenir tan pronto como sea posible.                       |

### Conclusiones y recomendaciones

El análisis de las molestias físicas de los trabajadores se realizó totalmente con base en sus percepciones, y es una evidencia de la presencia de problemas tanto en la organización del trabajo como en el uso de herramientas en el campo. Largos periodos de exposición y posturas inadecuadas son predominantes en la labor de siembra y cosecha de las hortalizas. La negación del efecto de las molestias de los trabajadores como un factor que incide sobre el rendimiento de su trabajo puede tener un trasfondo cultural. En culturas donde el admitir un dolor o molestia es señal de debilidad, el trabajador es movido a esforzarse más de su capacidad. Esta situación es propicia para el desarrollo de lesiones musculoesqueléticas que silenciosamente van apareciendo. Evidencia de esto son las estadísticas de dolencias presentadas por los trabajadores, donde se denota un incremento de estas en el área lumbar, la espalda alta e inclusive la cabeza, e la juventud y temprana adultez, y que tienen su punto máximo entre los 21 y los 30 años. Los trabajadores en estas edades asumen la mayor cantidad de manejo de cargas.

Un común denominador de estas labores de campo son las malas posturas, las repeticiones y la fuerza aplicada, exceptuando la siembra de zanahoria. En casi todos los casos, el nivel de riesgo postural está entre el III y el IV, por lo que la intervención debe darse casi inmediatamente. De igual forma, los valores del índice de levantamiento sobrepasan el recomendado de 2,5, en su totalidad. Estas condiciones de fuerza y malas posturas favorecen la aparición de trastornos musculoesqueléticos. Precisamente, el instituto NIOSH considera que la combinación de fuerza y repetición es el factor más decisivo para el desarrollo de enfermedades musculoesqueléticas. Diferentes autores también han documentado este tipo de posturas que conllevan el desarrollo de problemas musculoesqueléticos, en la recolección de frutos. Meyers y otros [9], [10] estudiaron cómo en la recolección de uvas las posturas de espalda inclinada en combinación con la fuerza

conlleven el desarrollo de dolor crónico en la espalda baja y problemas en los hombros. Steven Kirkhon y otros [11] apuntaron que los factores primarios de riesgo por ausencia de condiciones ergonómicas son exceso de fuerza, repeticiones y posturas incómodas.

La modificación de los tamaños de los sacos y los canastos de recolección son un punto importante para la disminución del riesgo. Esto incide directamente en el sistema de transporte de los productos entre las zonas de carga y de procesamiento, que se debe evaluar en conjunto por los productores y los comercializadores de los frutos.

El movimiento repetitivo en manos y muñecas en general es un factor de los niveles de riesgo I a III, con una percepción de molestia moderada, en las edades menores de 20 años. Pareciera no ser tan crítico, pero estudios previos han demostrado que actividades similares en otras áreas de la agricultura provocan serios problemas; por ejemplo, ya desde 1998 M. Stal [12] documentó que labores de ordeño, donde el movimiento de muñecas es intenso, originan la aparición de tendinitis en mano y muñeca, así como el síndrome del túnel carpiano, debido a la combinación de repetición y fuerza.

Las principales recomendaciones son destinar el tiempo adecuado para la recuperación de la parte del cuerpo afectada, diseñar herramientas para minimizar las posturas incómodas y ajustar el tiempo de exposición según el área del cuerpo involucrada. Según Fathallah, Miller y Miles [13], el trabajo de rodillas está considerado como uno de los factores que más contribuye a los desórdenes de espalda, en especial en el cultivo de hortalizas, frutas y vegetales, postura común en todas las actividades evaluadas. Las intervenciones más efectivas son las de ingeniería, que llevan al rediseño de herramientas, métodos y máquinas. Para prevenir lesiones de espalda el apropiado entrenamiento en la técnica de levantamiento es fundamental y es la primera opción, ya que es rápido y barato, siempre y cuando los pesos manipulados estén dentro de los valores adecuados.

## Referencias

- [1] Instituto Nacional de Seguros, INS, "Estadísticas". Disponible en <http://www.ins-cr.com/>. [Recuperado el 10-04-2007]
- [2] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Disponible en <https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos/agropecuario/publicaciones/reagropeccenagro2014-ti-006.pdf> [Recuperado el 20-03-2015]
- [3] Banco Mundial. Disponible en <https://www.bancomundial.org/es/understanding-poverty> [Recuperado el 05-04-2015]
- [4] "Elements of Ergonomics Programs: A Primer Based on Ergonomic Assessments of Musculoskeletal Disorders," National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Washington, DC: DHHS, Publication no. 91-117, 1997. Disponible en <http://www.cdc.gov/niosh/docs/97-117/eprefer.html>.
- [5] J. Dee, "Green industry injuries", *Engineering & Technology for a Sustainable World* no. 11, pp. 14-15, 2004.
- [6] R. Fontes, "Occupational Safety and Health in Latin America and the Caribbean: Overview, Issues and Policy Recommendations", en *Primer Seminario Técnico de Consulta Regional sobre Temas Laborales, 2001*, Ciudad de Panamá, Panamá.
- [7] U.S. Department of Agriculture. Disponible en <https://www.usda.gov/> [06-03-2015]
- [8] S. Konz and S. Johnson, *Work design: Occupational ergonomics*, 7<sup>th</sup> ed.. USA: Taylor and Francis Group, 2016, pp. 20-36.
- [9] J.M. Meyers, J.A. Miles, J. Faucett, I. Janowitz I, D.G. Tejada, and J.N. Kabashima, "Ergonomics in agriculture: Workplace priority setting in the nursery industry," *AIHA J.*, no. 58, pp. 121-126, 1997.
- [10] J.M. Meyers, J.A. Miles, J. Faucett, I. Janowitz I, D.G. Tejada, and J.N. Kabishima, "High risk tasks for musculoskeletal disorder in agricultural fieldwork," *Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress*, San Diego, CA, 2000.



- [11] S. Kirkhron, G. Richardson, and R.J. Banks, "Ergonomics risks and musculoskeletal disorders in production agriculture: Recommendations for effective research to practice," *Journal of Agromedicine*, no. 15, pp. 281-299, 2010.
- [12] M. Stal, S. Pinzke, G.A. Hansson, and C. Kolstrup, "Highly repetitive work operations in a modern milking system: A case-study of wrist positions and movements in a rotary system," *Ann. Agric. Environ. Med.*, no. 10, pp.67-72, 2003.
- [13] F.A. Fathallah, B.J. Miller, and J.A. Miles, "Low back disorders in agriculture and the role of stooped work: scope, potential interventions, and research needs," *J. Agric. Saf. Health*, no. 14, pp. 221–245, 2008.

# Prevención del golpe de ariete mediante el control del tiempo de cierre, al usar válvulas hidráulicas automatizadas

## Prevention of water hammer through control of the closing time, in automated hydraulic valves

Gregory Guevara-Rodríguez<sup>1</sup>, Adrian Vargas-Obando<sup>2</sup>,  
Juan Ignacio Quesada-Chanto<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 9 de noviembre de 2019*  
*Fecha de aprobación: 10 de marzo de 2020*

Guevara-Rodríguez, G; Vargas-Obando, A;  
Quesada-Chanto, J. I. Prevención del golpe de ariete mediante el control del tiempo de cierre, al usar válvulas hidráulicas automatizadas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 143-154.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4821>



- 1 Profesor de Riego y Drenaje. Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica. Correo electrónico: [gguevara@earth.ac.cr](mailto:gguevara@earth.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0001-9056-9847>
- 2 Gerente de Producto, Netafim, Centroamérica. Costa Rica. Correo electrónico: [adrian.vargas@netafim.com](mailto:adrian.vargas@netafim.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-5117-4989>
- 3 Gerente Técnico Comercial, DOROT, Latinoamérica. Costa Rica. Correo electrónico: [jquesada@dorot.com](mailto:jquesada@dorot.com)  
 <https://orcid.org/0000-0003-4252-2811>

## Palabras clave

Golpe de ariete; acueductos; válvulas hidráulicas.

## Resumen

Uno de los grandes retos que enfrentamos, al calibrar sistemas automáticos en riego y acueductos, es que la velocidad de los activadores eléctricos es muy rápida, lo que reduce la velocidad de respuesta de las válvulas en términos de apertura y cierre a algunos cuantos segundos. Estos cierres repentinos en la línea de conducción provocan ondas en el interior de la tubería que producen sobrepresiones que pueden generar daños en nuestro acueducto. El presente trabajo ofrece un enfoque alternativo al control y prevención del golpe de ariete, al analizar la relación entre el tiempo de cierre de una válvula en una conducción con pendiente positiva, el respectivo aumento en la línea piezométrica y cómo se puede regular esto mediante la calibración de la velocidad de cierre en el llenado de la cámara superior de las válvulas hidráulicas. Para la comprobación de los resultados, se muestra el caso de un proyecto de invernaderos, hidropónico, que opera con riegos automáticos, donde el tiempo de apertura y cierre de válvulas fue calibrado mediante el control del llenado de las cámaras de las válvulas.

## Keywords

Water hammer; aqueducts; hydraulic valves.

## Abstract

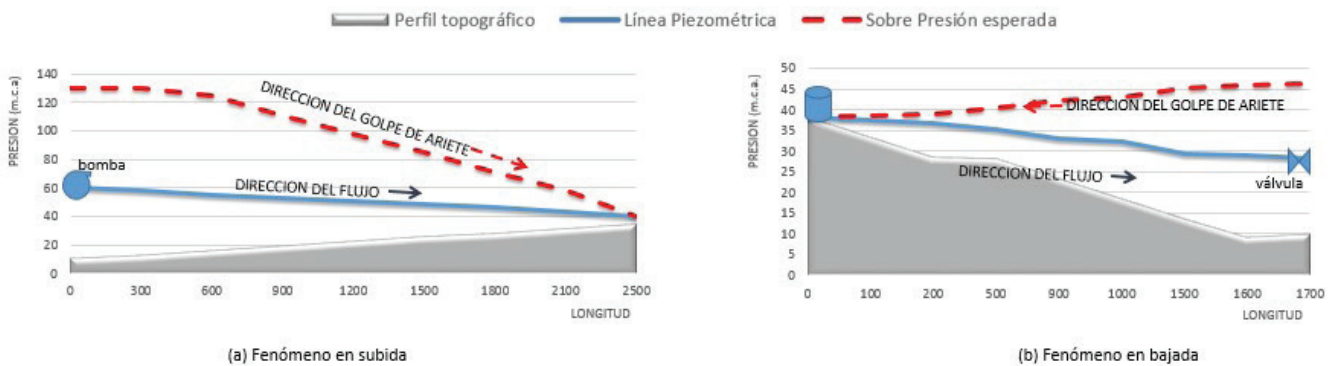
One of the greatest challenges we face when calibrating automatic systems in irrigation and aqueducts is the high speed of the electric actuators; it reduces the speed of response of the valves in terms of opening and closing to a few seconds. These sudden closures in the line of conduction promote waves inside the pipe that produce overpressures that may generate damages in the aqueduct. The present work is intended to offer an alternative approach to control and prevention of water hammer, by means of the analysis of the relationship between the closing time of the valve, in a conduction with positive slope; the respective increasing in the piezometric line, and how both can be regulated by calibration in the filling speed of the upper chamber of the hydraulic valves. To verify the results, the work shows a case study of a hydroponic greenhouse project that operates with automatic irrigation, where the valves closing time was calibrated by the filling control of the upper chamber of the hydraulic valves.

## El fenómeno del golpe de ariete

El golpe de ariete consiste en una alternación de depresiones y sobrepresiones debido al movimiento oscilatorio del agua en el interior de la tubería, producto de variaciones en las velocidades de flujo [1]. El fenómeno se manifiesta como una variación en la presión de la línea de flujo, producida básicamente, tanto en conducciones por gravedad como en sistemas de bombeo presurizado, al forzarse un paro brusco en la inercia del fluido en movimiento dentro de la tubería [2].

El cálculo de las sobrepresiones es importante para determinar las máximas presiones que deberá soportar el tubo; también se debe tomar en cuenta que si las depresiones igualan los valores de tensión del vapor del líquido, se producirá cavitación, incrementando el riesgo de rupturas de la tubería en la fase de sobrepresión [3] [4].

Resulta conveniente identificar un par de diferencias notables en la disposición de la estructura en análisis. Si la tubería va de subida a lo largo de un perfil topográfico, con un sistema de impulsión o bombeo, figura 1(a), el fenómeno se manifestará cuando la unidad de bombeo se detenga en forma no controlada; en el punto más bajo será donde se iniciará el golpe en dirección aguas abajo del bombeo y finalizará en el punto más alto de la conducción; el máximo valor de presión se alcanzará en la misma estación de bombeo. Si por el contrario la tubería va de bajada a lo largo del perfil topográfico, figura 1 (b), el fenómeno se formará en el momento en que se cierre en forma no controlada una válvula en algún punto bajo del perfil topográfico de su conducción, ocasionando un incremento de la línea piezométrica; por lo tanto, la anomalía se manifestará desde el punto de cierre de la válvula y se desplazará aguas arriba hasta su origen; el máximo valor se alcanzará (registrará) en el punto donde se cerró la válvula [4].



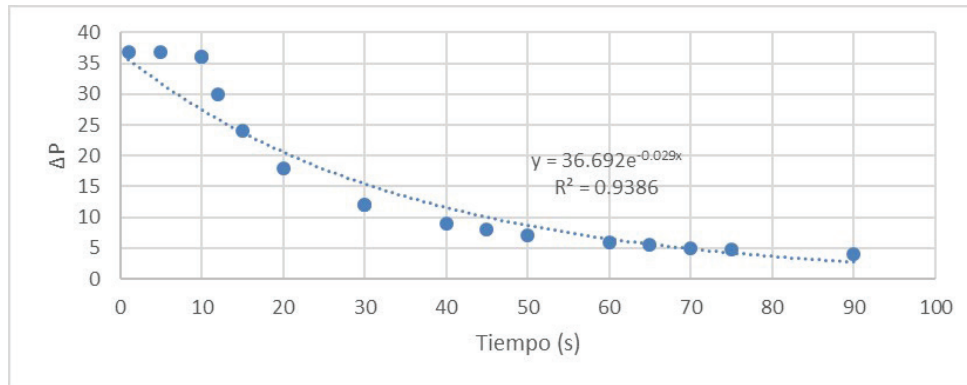
**Figura 1.** Descripción del golpe de ariete como aumento en la presión en la línea piezométrica.

Usando el principio de Bernoulli [5], podremos decir que el comportamiento del golpe de ariete como sobrepresión podrá ser calculado de la siguiente forma:

$$H = \frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\gamma} - h_f + \Delta P_{\text{producto golpe}}$$

Donde,  $H$  es la presión en el tubo y los siguientes términos son con los que normalmente se relaciona:  $\frac{v^2}{2g}$  es la carga cinética,  $z$  es la carga potencial,  $\frac{P}{\gamma}$  es la carga de presión del fluido, menos  $h_f$  son las pérdidas por fricción. Finalmente, el factor  $\Delta P_{\text{producto golpe}}$  es el producto a ese paro repentino, de la inercia en el fluido.

Al analizar que la magnitud numérica de la sobrepresión, producida con el golpe de ariete, depende de varios factores, la relación más directamente observable es con el tiempo en el que se interrumpe la continuidad del flujo, por lo que si tenemos la capacidad de calcular y prevenir las velocidades de cierre de nuestros dispositivos hidráulicos, tendremos la capacidad de control de los dañinos efectos de las sobrepresiones en el golpe de ariete [6], [7].

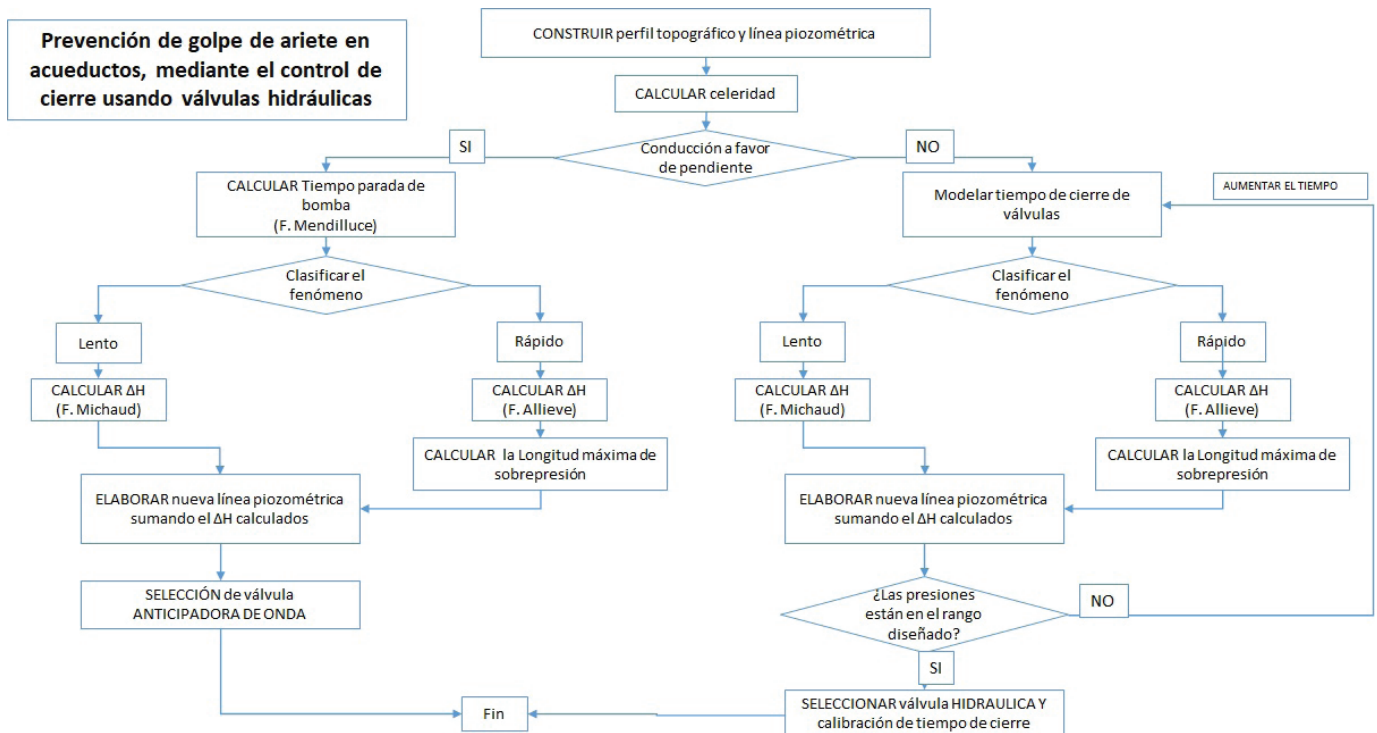


**Figura 2** Relación entre la sobrepresión y la velocidad de cierre, en golpes de ariete.

### Análisis del comportamiento de la onda

Al ser capaces de calcular el tiempo en que se produce el cierre, la velocidad con que viaja el golpe, sus máximos valores de presión y cómo alteran ellos el comportamiento de la línea piezométrica, o de energía a lo largo del perfil topográfico de nuestra conducción, podremos mediante modelación determinar la relación entre la velocidad de cierre de las válvulas y el efecto que se produce en la magnitud de la sobrepresión a lo largo del tubo [7], [8].

En la figura 3, se expresa el diagrama de flujo de cálculo para la selección de las válvulas hidráulicas, mediante un enfoque en la prevención de los riesgos producto del golpe de ariete.



**Figura 3** Diagrama de flujo para un nuevo enfoque en la selección de válvulas hidráulicas mediante la prevención del golpe de ariete.

### *Cálculo de la celeridad y duración del transitorio*

La celeridad ( $a$ ) se define como la velocidad con que se propaga la onda de sobrepresión a través del agua contenida en el tubo, luego de que se genera el fenómeno de cierre de válvula o paro brusco del bombeo [9].

La siguiente es una ecuación deducida para agua, producto de un análisis de la ecuación de movimiento y continuidad:

$$a = 9900 / (\sqrt{(48,3 + \frac{10}{\epsilon)} D/e})$$

Dónde  $a$  es la celeridad en (m/s),  $D$  es el diámetro del tubo (mm) y  $e$  es el espesor de tubo (mm).  $\epsilon$  es el módulo de elasticidad ( $\text{kg/m}^2$ ). Los valores del módulo de elasticidad de la tubería usada se presentan a continuación:

**Cuadro 1.** Módulo de elasticidad de materiales [10].

| Material de la tubería | $\epsilon$ ( $\text{kg/m}^2$ ) |
|------------------------|--------------------------------|
| Hierro y acero         | $2 \times 10^{10}$             |
| Fundición              | $1 \times 10^{10}$             |
| Hormigón               | $2 \times 10^9$                |
| PVC                    | $3 \times 10^8$                |
| PE baja densidad       | $2 \times 10^7$                |
| PE alta densidad       | $9 \times 10^7$                |

Se entiende que una fase del ciclo del golpe de ariete se da cuando la onda va desde su origen hasta el final de conducción y luego vuelve de nuevo a su lugar de origen. De esta forma, conociendo la longitud del tramo y con la celeridad, analizada anteriormente, nos resulta sencillo despejar el tiempo de duración de la fase ( $t_o$ ) en que la onda recorre una distancia  $L$ .

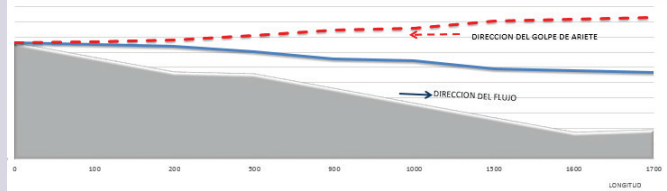
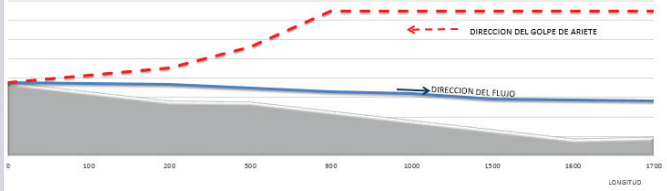
$$t_o = \frac{2 \cdot L}{a}$$

### *Determinación del tipo de cierre*

Joukowski, a finales del siglo XIX, y luego afinado por Allieve en 1903, propuso que el tiempo de duración de la fase ( $t_o$ ) es la relación entre la celeridad y la longitud que recorre una onda, siendo esta última dos veces la distancia de la conducción. Ahora que conocemos si el tiempo de cierre de válvula o de parada de bomba es menor o mayor que el tiempo de fase, podremos entender de mejor forma la condición en que se dan las sobrepresiones en la línea [2].

**Cierre rápido:** Si el tiempo de cierre de válvula o de parada en bomba es menor que el tiempo de fase, estamos en presencia de cierre rápido, debido a que la onda no ha terminado de ir y venir cuando ya se ha detenido totalmente el sistema. Esto quiere decir que la sobrepresión se presentará en cualquier lugar de la conducción y se mantendrá constante hasta un punto específico, que dependerá de la magnitud del golpe [11].

**Cierre lento:** Si el tiempo de cierre de válvula o de parada en bomba es mayor que el tiempo de fase, estamos en presencia de cierre lento, debido a que la onda ha terminado de ir y venir cuando aún no se ha logrado el cierre total del sistema. En estos casos, la sobrepresión es máxima en el punto de cierre y luego decrece linealmente hasta el origen de la tubería [11].

| Comportamiento de la sobrepresión   | Tipo de cierre | Criterio de comparación           |
|---|----------------|-----------------------------------|
|  | Lento          | $T_c > t_0 = \frac{2 \cdot L}{a}$ |
|  | Rápido         | $T_c < t_0 = \frac{2 \cdot L}{a}$ |

**Figura 4.** Criterios para el tipo de cierre.

En acueductos donde se aumenta la cota topográfica, el fenómeno del golpe de ariete se dará producto del cierre repentino de la válvula. El golpe, en su máxima magnitud de presión, se manifestará en el punto donde se cierre una válvula, por lo tanto, el tiempo de cierre del sistema será el tiempo que manual, eléctrica o mecánicamente tarde en cerrarse la válvula, por lo que podrá ser manipulado por el usuario [12].

A diferencia de los fenómenos formados en tuberías en bajada, donde fácilmente por medio de un cronómetro se podrá determinar las velocidades de cierre; en las estaciones de bombeo, es más difícil determinar el tiempo de parada de impulsión y su respuesta contra la inercia [13]. Mendiluce [14] propuso la siguiente fórmula empírica para determinar el tiempo de parada de una bomba:

$$T = C + \frac{k \cdot L \cdot v}{g \cdot CDT}$$

Donde  $T$  es el tiempo de parada en segundos,  $L$  es la longitud de conducción en metros,  $v$  es la velocidad del agua en m/s,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $CDT$  es la carga dinámica total (*m.c.a*)

El coeficiente empírico  $C$  depende de la pendiente hidráulica, donde

$$CDT/L < 0,2 \rightarrow C=1$$

$$CDT/L \geq 0,4 \rightarrow C=0$$

$$CDT/L \approx 0,2 \rightarrow C=0,6$$

El coeficiente empírico  $k$  depende de la longitud:

$$L < 500 \rightarrow k=2$$

$$L \approx 500 \rightarrow k=1,75$$

$$500 < L < 1500 \rightarrow k=1,5$$

$$L \approx 1500 \rightarrow k=1,25$$

$$L > 1500 \rightarrow k=1$$

### Cálculo de sobrepresiones

Al clasificar los cierres de válvula en los criterios de rápidos y lentos, nos es conveniente analizar el comportamiento de la nueva línea piezométrica, sometido a la onda de sobrepresión producto del paro del sistema. Ahora podremos calcular la máxima magnitud de la sobrepresión en función del tiempo de paro o cierre en el sistema y mediante modelación, planificar diseños en función de las máximas presiones posibles.

En *cierre lento*, si la velocidad de cierre es menor que el tiempo que dura la onda en ir y venir, se evitará que en algún momento las ondas choquen entre ellas; esto hará que tengamos el punto de máxima energía en el lugar de cierre; de esta forma, la sobrepresión será decreciente desde el final del tubo hacia su origen. La fórmula propuesta por Michaud indica que la sobrepresión dependerá de dos veces la longitud, que es la distancia que recorre la onda, y estará en función del diferencial del cambio en la velocidad, siendo el caso más extremo cuando la velocidad final sea cero, producto de un paro total del sistema [12], [15], [16].

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot T} \quad (\text{fórmula de Michaud para cierre lento})$$

Donde  $\Delta H$  es la sobrepresión expresada en metro de columna de agua,  $L$ ,  $v$ ,  $g$  y  $T$  son la distancia, la velocidad, la gravedad y el tiempo de parada respectivamente propuestos para el sistema.

En *cierre rápido*, a diferencia de los sistemas de cierre lento, las ondas de sobrepresión terminan chocando en el interior del sistema; por lo tanto, la sobrepresión no necesariamente se presenta en el punto de paro, sino que se extiende en forma constante desde el origen del golpe hasta un lugar determinado, por lo tanto, su valor es una constante que no depende de la longitud del tubo [1], [16].

$$\Delta H = \frac{a \cdot v}{g} \quad (\text{fórmula de Allievi para cierre rápido})$$

Al igualar ambas ecuaciones de sobrepresión de Allievi y Michaud y despejar su valor de longitud, esta será la distancia desde donde Michaud es máxima y luego empieza a decrecer; por lo tanto, la conoceremos como la longitud de sobrepresión decreciente ( $L_{\Delta HDec}$ )

$$\frac{2 \cdot L_{\Delta HDec} \cdot v}{g \cdot T} = \Delta H = \frac{a \cdot v}{g}$$

$$L_{\Delta HDec} = \frac{a \cdot T}{2}$$

Este valor, longitud de sobrepresión decreciente ( $L_{\Delta HDec}$ ), resulta importante en la construcción de la nueva línea piezométrica sometida al fenómeno de golpe de ariete; desde esta ubicación en el acueducto y en el sentido en que la onda se mueva, la magnitud de la sobrepresión siempre irá en descenso. Si estamos en presencia del fenómeno lento, en el sentido más práctico del análisis, este lugar será donde se produce el paro del sistema (apague de bomba o cierre de válvula), y a partir de esta ubicación las sobrepresiones gozarán de magnitudes menores. Bajo condiciones de cierre rápido, sabemos que la máxima magnitud de la sobrepresión se regirá por la fórmula de Allievi; este régimen se extenderá en forma constante, hasta que inicio el régimen de decrecimiento según Michaud; por lo tanto, la longitud de sobrepresión constante



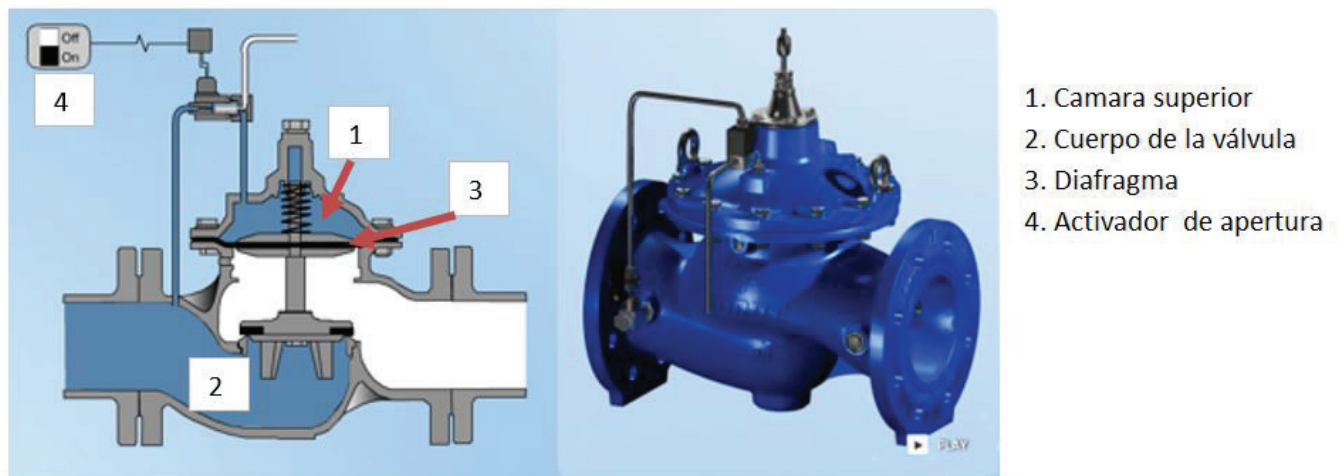
( $L_{\Delta HCte}$ ), bajo la cual se extenderá el régimen de máxima sobrepresión en regímenes rápidos, estará dada por:

$$L_{\Delta HCte} = L - L_{\Delta HDec}^4$$

Los parámetros de sobrepresión y ubicación nos son de importancia para el análisis del comportamiento del fenómeno y a partir de ahí, para decidir si es conveniente, mediante este proceso de modelaje, inferir sobre las mejores decisiones para la selección y calibración de válvulas.

### Control de velocidad de cierre en válvulas hidráulicas

Las *válvulas hidráulicas* son imprescindibles para solventar un buen número de problemas que se presentan en toda instalación hidráulica: apertura y cierre, regulación de presión aguas arriba y aguas abajo de la válvula y control de boya, entre otras funciones; todas estas aplicaciones en la mayoría de los casos son controladas automáticamente mediante activadores eléctricos o hidráulicos [16]. Estas válvulas en su exterior están constituidas por dos piezas (el cuerpo y la tapa); en su interior se encuentra la membrana o diafragma de caucho, que es el elemento actuante que permite la apertura o cierre al paso del agua. La válvula exterior de tres vías permite la apertura o cierre manual de la válvula, así como la actuación de esta de acuerdo con una señal hidráulica o eléctrica remota [16].



**Figura 5.** Partes de una válvula hidráulica [19].

### Control de la velocidad de llenado de la cámara

La cámara de la válvula (parte superior del diafragma) está conectada a la atmósfera; la presión de *agua* del interior de la tubería empuja la membrana hacia arriba, abriendo la válvula y por tanto el paso de agua. Cuando se comunica a la cámara de la válvula la presión de agua de la tubería (aguas arriba de la válvula), esta comprime el diafragma hacia abajo, produciendo el cierre completo de la válvula y por lo tanto el corte al paso del agua. Esta operación puede realizarse fácilmente mediante la válvula de 3 vías situada en la tapa de la válvula hidráulica. Este es el funcionamiento de la válvula básica, es decir, abierta-cerrada [16].

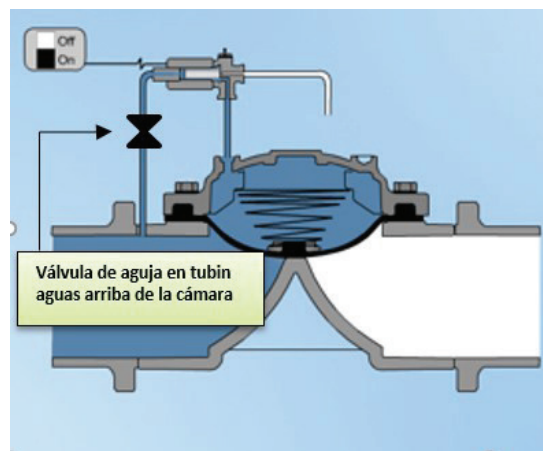
4 Si diseñamos con pendientes hidráulicas mayores al 50%, se recomienda usar la fórmula de Allievi a lo largo de toda la distancia L.

Que la válvula se abra o cierre en un determinado tiempo depende directamente de los siguientes factores:

1. La presión del sistema.
2. El volumen de la cámara superior, que debe ser llenado para el cerrado y drenado para la apertura.
3. El diámetro del conducto de llenado o drenado de la válvula.

Al analizar con detalle los factores 2 y 3, que condicionan la velocidad de cierre, observamos que al llenarse la cámara superior, se cierra la válvula, por lo que concluimos que a mayor velocidad de llenado más rápido se cerrará la válvula. Esta es una propiedad que viene intrínseca en el diseño de los elementos hidráulicos que forman la válvula; no obstante, si deseamos aumentar el tiempo de cierre de la válvula, basta con controlar el flujo de ingreso a la cámara.

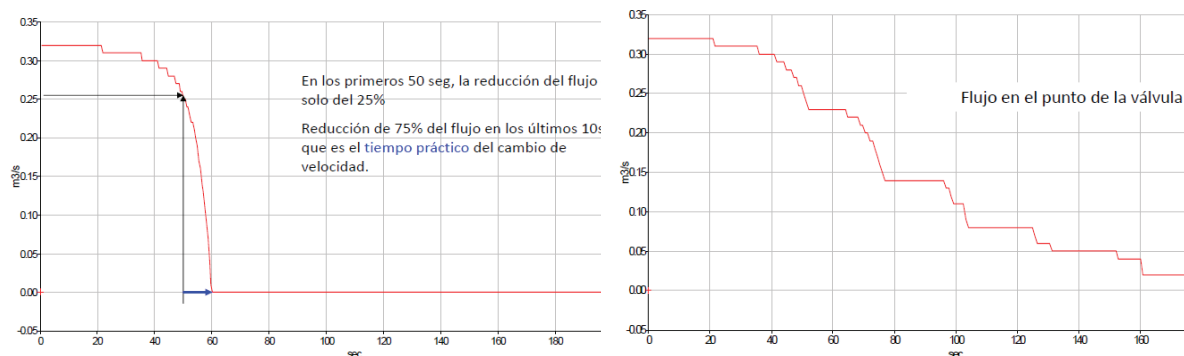
Para controlar el ingreso de agua a la cámara disponemos de dos alternativas: la primera consiste en una selección del diámetro del *tubin* que conecta aguas arriba la válvula con la cámara superior. La otra alternativa, sencilla, es la colocación de una válvula de aguja en el *tubin* que alimenta la cámara, de modo que mediante una contracción en la alimentación de la cámara, podamos reducir el flujo y con esto, aumentar la velocidad de cierre de la válvula.



**Figura 6.** Esquema de ubicación de la válvula de aguja para la calibración de la válvula.

#### *Control de la velocidad con pilotos de cierre uniforme*

Si bien estos dispositivos mecánicos producen un retardo y una velocidad de cierre uniforme, no garantizan la eliminación de sobrepresiones positivas y negativas en el sistema. En válvulas de control hidráulico con tiempos de cierre uniforme de 60 s, se ha determinado que en los primeros 50 s la reducción del flujo alcanza únicamente el 25%. La reducción del restante 75% del flujo se da en los posteriores 10 s, lapso conocido como *tiempo práctico* del cambio de velocidad [18].



Gráfica de tiempo de cierre de una válvula estándar

Gráfica de tiempo de cierre de un con piloto con dispositivo SP DOROT

**Figura 7.** Comparación caudal vs. tiempo cierre en válvulas estándar y con piloto de cierre constante [20].

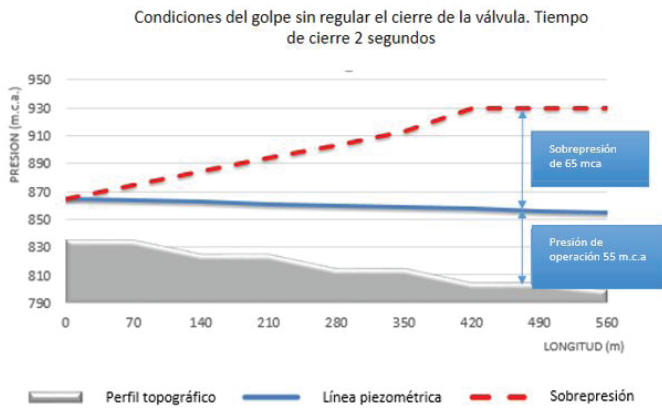
Existen pilotos que pueden autoajustar en forma automática y dinámica la velocidad de cierre de las válvulas en cualquier función de control y así resolver las limitaciones de los dispositivos anteriormente mencionados [19].

El comportamiento de los pilotos de cierre lento es similar a lo que se conoce como *cierre lineal*, cierre que es controlado y postergado en el tiempo [21]. Ante una acción de cierre, el piloto en caso de detectar una presión superior a la calibración, inmediatamente se detendrá; el proceso de cierre se retomará cuando la presión se estabilice y esté por debajo de la presión de calibración. La presión de calibración del piloto se gradúa a 5 m.c.a. por encima de la presión estática del sistema. En caso de presiones excesivas, el piloto ordenará abrir la válvula, la cual funcionará como una válvula de alivio rápido [20].

### Caso de estudio

En una red de invernaderos, la fuente de agua, el bombeo y el cabezal de inyección de fertirriego están ubicados en la cota 835 m.s.n.m.; los invernaderos se dispusieron en diferentes terrazas, la primera en la misma cota de la estación de fertirriego y la última en la cota 800 m.s.n.m. Los invernaderos son regados mediante hidroponía en sustrato de coco por goteo autocompensado y autodrenante, con riegos muy cortos, menores de 120 segundos y controlados con válvulas hidráulicas reguladoras de presión (1 válvula por invernadero), accionadas con solenoides de 24 VAC, con un tiempo de cierre de la válvula menor de 2 segundos. Las válvulas manejan en promedio 50 m<sup>3</sup>/h y son alimentadas por una tubería independiente que lleva el agua con nutrientes desde el cuarto de riego hasta el invernadero en operación. La inyección se da mediante una máquina de fertirriego modelo Netajet High Flow marca Netafim, que regula la proporción de fertilizante en función de valores de pH y conductividad eléctrica preestablecidos.

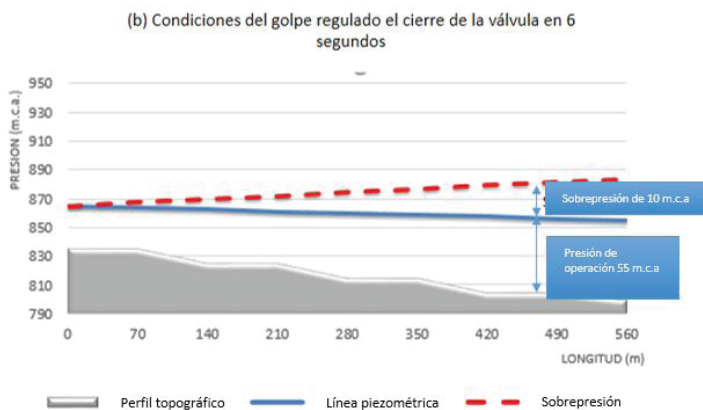
Durante la operación, debido a los cierres tan rápidos de las válvulas, el sistema elevaba las presiones durante los cierres; esto estaba ocasionando los típicos problemas de ruptura de tubos y accesorios, provocados por el viaje y el golpe de las ondas; pero además ocasionaba que los dispositivos de prevención se abrieran como válvulas de alivio al final de cada riego, lo que conllevaba una serie de problemas operativos: despresurización de la red y goteros antidrenantes, por lo que se perdía tiempo valioso en la respuesta de apertura de los riegos, lo que afectaba el volumen real de agua aplicada. Además, las máquinas de inyección de fertilizante entraban en ciclos de ajuste del caudal, lo que causaba pérdida de precisión en la aplicación del fertilizante, producto de los cambios en las conductividades eléctricas. En la figura 8 se muestra el comportamiento de la variación de los volúmenes aplicados, producto del golpe que abría las válvulas de alivio.



| Terraza                 | Invernadero | Parámetro evaluado         |             |   |
|-------------------------|-------------|----------------------------|-------------|---|
| A                       | 5           | Variación EC               | 4,6%        | 🟡 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -10,3%      | 🔴 |
|                         | 13          | Variación EC               | 3,6%        | 🟡 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -7,0%       | 🔴 |
| B                       | 6           | Variación EC               | -2,1%       | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -0,3%       | 🟢 |
|                         | 12          | Variación EC               | 4,8%        | 🟡 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -8,9%       | 🔴 |
| C                       | 7           | Variación EC               | 4,6%        | 🟡 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -10,8%      | 🔴 |
|                         | 11          | Variación EC               | -6,0%       | 🟡 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -9,3%       | 🔴 |
| D                       | 8           | Variación EC               | -2,3%       | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -12,2%      | 🔴 |
|                         | 10          | Variación EC               | 6,5%        | 🟡 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -6,6%       | 🟡 |
| E                       | 9           | Variación EC               | -3,4%       | 🟡 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -6,0%       | 🟡 |
| <b>Resumen proyecto</b> |             | <b>Variación EC</b>        | <b>4,2%</b> | 🟡 |
|                         |             | <b>Variación en Caudal</b> | <b>7,9%</b> | 🔴 |

Figura 8. Tablero de control con los resultados de operación del fertirriego, antes de regular el cierre de válvulas.

Se procedió a una modelación y ajuste del tiempo de cierre de válvulas, usando válvulas de aguja en el *tubin* que llena la cámara hidráulica. El criterio buscado fue que la válvula cerrara tan rápido como para manejar un adecuado control del tiempo de riego, pero no tan rápido como para que disparara las válvulas de alivio por la sobrepresión y evitar que estas últimas causaran problemas estructurales en las tuberías. En este caso, se usó tubería de 4" SDR 32,5, con una presión máxima operativa de 8,8 bares. Se decidió que el mínimo tiempo que podríamos operar el cierre de la válvula sería de 6 segundos, para no causar sobrepresión que superara la capacidad del tubo. Se reguló el cierre de todas las válvulas en ese tiempo. Los resultados en uniformidad de caudal y conductividad fueron absolutamente positivos. En la figura 9 se muestra la respuesta después de variar el tiempo de cierre a 6 segundos, evitando presiones críticas que disparan las válvulas de alivio.



| Terraza                 | Invernadero | Parámetro evaluado         |             |   |
|-------------------------|-------------|----------------------------|-------------|---|
| A                       | 5           | Variación EC               | 1,4%        | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | 2,2%        | 🟢 |
|                         | 13          | Variación EC               | 1,4%        | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -1,0%       | 🟢 |
| B                       | 6           | Variación EC               | -2,0%       | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -1,5%       | 🟢 |
|                         | 12          | Variación EC               | 2,1%        | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | -4,5%       | 🟡 |
| C                       | 7           | Variación EC               | -1,2%       | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | 2,0%        | 🟢 |
|                         | 11          | Variación EC               | -3,1%       | 🟡 |
|                         |             | Variación en Caudal        | 2,6%        | 🟢 |
| D                       | 8           | Variación EC               | 1,4%        | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | 2,2%        | 🟢 |
|                         | 10          | Variación EC               | 1,6%        | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | 4,6%        | 🟡 |
| E                       | 9           | Variación EC               | 0,8%        | 🟢 |
|                         |             | Variación en Caudal        | 3,0%        | 🟡 |
| <b>Resumen proyecto</b> |             | <b>Variación EC</b>        | <b>1,7%</b> | 🟢 |
|                         |             | <b>Variación en Caudal</b> | <b>2,6%</b> | 🟢 |

Figura 9. Tablero de control con los resultados de operación del fertirriego, luego de calibrar el tiempo de cierre de las válvulas en 6 segundos.

## Conclusiones

Mediante el empleo de las ecuaciones actuales de la mecánica de fluidos y el análisis de línea de energía o piezométrica de un acueducto, es posible realizar el análisis de las sobrepresiones en el golpe de ariete, en función del tiempo de apertura de las válvulas. Conocer las magnitudes en que las ondas de presión viajan durante el fenómeno del golpe de ariete nos resulta útil para colocar los dispositivos adecuados, capaces de mitigar o controlar sus efectos, y si podemos controlar el tiempo en que se desarrolla el golpe de ariete, podremos reducir los posibles daños que enfrentar.

Con el presente enfoque metodológico se busca mediante un modelado hidráulico y un proceso de calibración de las válvulas en campo, poder reducir los daños ocasionados durante un transitorio, por el súbito cierre de los activadores de alta velocidad presentes en el mercado.

Para un mejor entendimiento del tema es importante abordar otros análisis como el tiempo de duración de la onda, la magnitud y la cantidad de réplicas que siguen a la primera onda, así como otros datos que completarán el análisis del fenómeno.

## Referencias

- [1] J. Twyman, "Golpe de ariete en una red de tuberías debido al cierre rápido de una válvula," *Revista de Ingeniería en Construcción*, vol. 33, no. 2, 2018.
- [2] R. Mott and J. Untener, *Applied Fluid Mechanics*, 7th ed. USA: Pearson, 2015.
- [3] A. Malekpour, B. Karney, R. St. Aubin, P. Martino, and L. Gill, "Exploring the sensitivity of fatigue analysis with regard to design parameters in PVC pipes subjected to cyclic transient pressures," *Procedia Engineering*, vol. 119, pp. 174-181, 2015.
- [4] W. Wan and B. Zhang, "Investigation of water hammer protection in water supply pipeline systems using an intelligent self-controlled surge tank," *Energies*, pp. 11-16, 2018.
- [5] Universidad de Oviedo, "Práctica de laboratorio: golpe de ariete", en *Curso de especialidad en centrales eléctricas*, Oviedo, 2010.
- [6] R. Nerella and E. Rathnam, "Fluid transients and wave propagation in pressurized conduits due to valve closure," *Procedia Engineering*, vol. 127, pp. 1158-1164, 2015.
- [7] B. Jung and B. Karney, "A practical overview of unsteady pipe flow modeling: From physics to numerical solutions," *Urban Water Journal*, vol. 14, no. 5, pp. 1-7, 2016.
- [8] S. Manbretti, *Water Hammer Simulations*. Brasil: WIT Press, 2015.
- [9] J. Twyman, "Golpe de ariete en una red de distribución de agua," *XXI, PAIDEIA*, vol. 6, pp. 53-68, 2018.
- [10] J. Callister and William D, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [11] I. Pothof and B. Karney, "Guidelines for transient analysis in water and distribution systems", Intech, 2013.
- [12] J. Yu, Z. Wu, Y.-X. Yuan, M. Zhao, and C.-G. Wu, "Optimal valve closure for long-distance water transmission," *Sustain. Environ. Res.*, vol. 20, no. 5, pp. 287-291, 2010.
- [13] G. Z. Watters, *Analysis and control of unsteady flow in pipes*, 2nd ed.. USA: Butterworths, 1984.
- [14] W. Wan, B. Zhang, and X. Chen, "Investigation on water hammer control of centrifugal pumps in water supply pipeline systems," *Energies*, no. 12, 2019.
- [15] J. Twyman, "Interpolation schemes for valve closure modelling," *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 26, no. 3, 2018.
- [16] K. A., "An analysis of the impact of valve closure time on the course of water hammer," *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, vol. 63, no. 1, pp. 35-45, 2016.
- [17] Y. Dvir, "Flow control devices," Israel: Bermad, 1995.
- [18] Bermad Company, "Hydraulic valve for control," Israel: Irrigation, 2015.
- [19] Dorot, Control Valves, "Control de niveles en reservorios," *Boletín Técnico Dorot*, vol. 11, 2017.
- [20] G. Heimann, "Water Hammer," in *Seminario Latinoamericano Válvulas Hidráulicas Dorot*, Tel Aviv, Israel, 2018.
- [21] T. Janus and U. B., "Hydraulic modelling for pressure reducing valve controller design," *Procedia Engineering*, vol. 186, p. 635 – 642 , 2017.