



TECNOLOGÍA *en marcha*

Revista trimestral
Abril - Junio 2022
Volumen 35-2
ISSN-E 2215-3241



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos



Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica 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://unsplash.com/>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 35-2, Abril-Junio 2022-
Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618
Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr
Web: editorial.tec.ac.cr
http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



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



www.latindex.unam.mx



<http://www.scielo.org/>



dialnet.unirioja.es



<http://www.amelica.org>



<https://redib.org>



<http://www.doaj.org/>

TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Modelo dinámico de la velocidad del viento en una zona boscosa tropical Dynamic model of wind speed in a tropical forested landscape <i>Gustavo Richmond-Navarro, Gustavo Murillo-Zumbado, Frank Marín-Guillén, Pedro Casanova-Treto</i>	3
Implementación de metodologías analíticas para la caracterización de aguas geotérmicas para aplicación en usos directos Implementation of analytical methodologies for characterization of geothermal waters for direct uses <i>Diana Robles-Chaves, Olman Alberto Arias-Molina</i>	16
Presencia de microplásticos en especies marinas del Parque Nacional Marino las Baulas Presence of microplastics in marine species of the Marine National Park las Baulas <i>María Angélica Astorga-Pérez, Karol Ulate-Naranjo, Lilliana Abarca-Guerrero</i>	27
Estimation of the leaf area index from Sentinel images in <i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill plantations Estimación del índice de área foliar a partir de imágenes Sentinel en plantaciones de <i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill <i>Rudy Solís-Silvan, Facundo Sanchez-Gutiérrez, Raúl Islas-Jesús, José Geronimo-Torres, César Pozo-Santiago, Baltazar Sanchez-Díaz</i>	39
Remoción de materia orgánica natural por tratamiento convencional de agua en un río tropical Natural organic matter removal by conventional water treatment in a tropical river <i>Joaquín Jiménez-Antillón, Sidney Quesada-Delgado, Luis Romero-Esquivel</i>	48
Secado de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> utilizando radiación de microondas Drying of <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> using microwave radiation <i>Simón E. Luckert Froget, Pedro R. Benítez Díaz, Styles W. Valero, Williams J. León Hernández, Ilvania Gutiérrez Gotera</i>	61
Aplicación de un índice de seguridad inherente para definir el nivel de riesgo químico: Caso de estudio en un laboratorio de investigación de un centro universitario Application of an inherent safety index to define the level of chemical risk: Case study in a research laboratory of a university center <i>Joel Barrantes-Guzmán, Fernanda Barrantes-Rojas, Fiorella Camacho-Rojas, Gloriana Obando-Santamaría, Nidia Quesada-García, José Carlos Mora-Barrantes</i>	76

Contenido de metales pesados en varios ríos de Costa Rica Heavy metals content in several rivers in Costa Rica <i>Noemi Quirós-Bustos, Guillermo Calvo-Brenes, Diana Robles-Chaves, Andrey Caballero-Chavarría</i>	93
Efecto de niveles de aplicación de guano de islas en incremento de frutos de cacao Effect of application levels of guano of islands in increase of cocoa fruits <i>Maximo Parco-Quispe, Alina Alexandra Camacho-Villanueva, Jhimy Andy Parco-Quinchori, Fiorela Edith Dionisio-Saldaña</i>	105
Variabilidad de densidad en sentido radial y dentro de un anillo de crecimiento en <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> de 25 años de edad Density variability in radial direction and in growth ring of <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> from plantations of 25 years old <i>Gabrialy Márquez C., Styles W. Valero, Williams J. León H., Ilvania J. Gutiérrez G., Julio C. Maldonado R.</i>	115
Implementaciones tecnológicas en la prueba de valoración funcional y desempeño corto <i>Short Physical Performance Battery</i> (SPPB), para el adulto mayor Technological implementations in the functional assessment and short performance test <i>Short Physical Performance Battery</i> (SPPB) for the elderly <i>María Cristina Vargas-Del-Valle, Olga Sánchez-Brenes, Magaly Sánchez-Brenes, Arturo Huete-Calderón, Ronny Arias-Mora</i>	125
Éster de aceite de palma (<i>Elaeis guineensis</i>) como aditivo deshidratante de crudos Ester of palm oil (<i>Elaeis guineensis</i>) as a dehydrating additive for crude oils <i>Rubén Darío Vega-Mejía, José Gregorio Jiménez-Marcano</i>	139
Ensayos <i>in vitro</i> para cuantificar la actividad biológica de citocinas <i>In vitro</i> assays to quantify the biological activity of cytokines <i>Ayerin Carrodegua-González, Andrés Zúñiga-Orozco, María Victoria Ortiz-Cruz</i>	152
Obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y bagazo de caña Nanocellulose production from African oil palm rachis and sugarcane bagasse <i>Eddy Gabriel Jirón-García, Karina Rodríguez-Mora, Cesar Bernal-Samaniego</i>	167

Modelo dinámico de la velocidad del viento en una zona boscosa tropical

Dynamic model of wind speed in a tropical forested landscape

Gustavo Richmond-Navarro¹, Gustavo Murillo-Zumbado²,
Frank Marín-Guillén³, Pedro Casanova-Treto⁴

Fecha de recepción: 5 de abril de 2021
Fecha de aprobación: 6 de agosto de 2021

Richmond-Navarro, G; Murillo-Zumbado, G; Marín-Guillén, F; Casanova-Treto, P. Modelo dinámico de la velocidad del viento en una zona boscosa tropical⁵. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 3-15.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5465>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: g-richmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: gmurillo@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1947-3567>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: fmarin@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0136-5728>
- 4 Universidad de Costa Rica. Costa Rica
Correo electrónico: pedro.casanova@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8508-6293>
- 5 Los autores aquí firmantes están de acuerdo con la versión final de este documento y hacen constar que la conceptualización, preparación y corrección del artículo se realizó según la siguiente distribución: GRN 70%; GMZ 20%; PCT 5%; FMG 5%



Palabras clave

Velocidad del viento; recurso eólico; longitud de rugosidad; zonas boscosas; modelo dinámico.

Resumen

Costa Rica establece en sus estrategias nacionales el desarrollo de energías renovables para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, la explotación del recurso eólico es una de las alternativas para este fin. Para maximizar este recurso es necesario entender la interacción del viento con el terreno, en especial en un país que el 52 % de cobertura corresponde a zona boscosa. Lograr encontrar un modelo dinámico que describa la conducta del viento y que considere la longitud de rugosidad como variable y no como una constante, como usualmente se utiliza en la literatura, es el objetivo de este trabajo. Para lograr esto se analizan series de tiempo de datos obtenidos de dos estaciones meteorológicas, administradas por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), ambas estaciones ubicadas en el Campus de Cartago del ITCR, los datos corresponden a alturas sobre el suelo de 1.5 m y de 10 m. Se utiliza el software Eureka para encontrar la relación de las distintas variables meteorológicas, tanto para la longitud de rugosidad como para la velocidad del viento. Se obtienen varias expresiones en distintos escenarios y se logra obtener un modelo para la velocidad del viento en el eje vertical, que sustituye el valor clásico de la longitud de rugosidad por una función, haciendo posible estimar el valor de la velocidad del viento en el eje vertical con mediciones en un punto cercano al suelo de modo que evita tener que instalar equipo costoso y grandes estructuras.

Keywords

Wind speed; wind resource; roughness length; forested landscape; dynamic model.

Abstract

Costa Rica has established the development of renewable energy sources as part of the strategy to diminish the fossil fuel dependency. The utilization of wind as a source of energy is one of the alternatives. To maximize the use of wind is necessary to understand the wind-landscape interaction, especially in a country where 52 % of the terrain is covered by forest. The aim of this paper is to find a dynamic model that describes the wind behaviour that considers the roughness length as a variable and not as a constant, as it is usually considered within the literature. A series of data obtained from two different weather stations are analysed. The weather stations are managed by two different institutions: Instituto Tecnológico de Costa Rica (Costa Rica Institute of Technology) and Instituto Meteorológico Nacional (Costa Rica Institute of Meteorology). Both weather stations are located at the main campus of Costa Rica Institute of Technology and data were obtained at two heights above ground level: 1.5 meters and 10 meters. Eureka software was used to find a correlation between the different weather variables and roughness length as for wind speed. Several expressions are obtained in various scenarios as well as a model for wind speed that replaces the classic roughness length constant value with a dynamic expression, being able to estimate the wind speed at the vertical axis with data from a measuring height near to the ground, avoiding the investment in high value equipment and the necessity of installing support structures of considerable scale.

Introducción

Las fuentes de energía renovables son de particular interés para los países en vías de desarrollo [1]. A manera de ejemplo, una de las principales estrategias de la República de Costa Rica en su Plan Nacional de Energía 2015 – 2030, es disminuir la dependencia de combustibles fósiles [2], una alternativa que contribuye a alcanzar este tipo de objetivos es la explotación del recurso eólico.

El comportamiento del viento depende en gran medida de la composición de la superficie, siguiendo con el ejemplo de Costa Rica, su superficie está cubierta en un 52 % por zonas boscosas [3], lo cual es usual en los países tropicales. Por esta razón, es necesario comprender en detalle la interacción entre este tipo de terrenos y el viento, para aprovechar el recurso eólico en las zonas boscosas tropicales.

En la literatura existen múltiples modelos para el perfil de viento, por ejemplo, la Ley Logarítmica [4] mostrada en la ecuación 1, relaciona la magnitud de la velocidad del viento (u); con la altura sobre el suelo (z), el esfuerzo cortante superficial (τ_0), la densidad del aire (ρ), la longitud de rugosidad (z_0) y la constante de Von Karman (k).

$$u = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

La longitud de rugosidad se define como la altura sobre el suelo a la cual la velocidad es nula, depende principalmente de la vegetación y el tipo de terreno. Según el tipo de superficie varios autores han reportado valores para la longitud de rugosidad como se muestra en el cuadro 1, del cual destaca que, en terreno plano como hielo, la longitud de rugosidad es sumamente pequeña. También se puede apreciar que para superficies específicas existe una discrepancia notable cuando se comparan los valores reportados por los diferentes autores.

Cuadro 1. Valores de longitud de rugosidad para diferentes terrenos según varios autores.

Surface	ESDU (1972)	Troen and Lundtang Petersen (1989)	Wieringa (1992)	Fiedler according to Hasager and Jensen (1999)	Davenport <i>et al.</i> (2000)
Ice	10-5				
Water	10 ⁻⁴ - 10 ⁻³				
Snow	0.002				
Bare soil		0.03	0.004	0.03	0.005
Grassland	0.005-0.02	0.03	0.06	0.08	0.03
Winter crops (winter)		0.1	0.09	0.12	0.1
Winter crops	0.05	0.1	0.18	0.09	0.25
Summer crops	0.05	0.1	0.18	0.09	0.25
Clearings		0.1	0.35	0.004	0.2
Shrubs	0.3	0.4	0.45	0.3	0.5
Conifer forest	1-2	0.4	1.6	0.9	1.0
Deciduous forest	1-2	0.4	1.7	1.2	2.0
Settlement	0.5-2	0.4	0.7	0.5	2.0

Una manera usual de emplear la Ley Logarítmica de la ecuación 1 es relacionar la velocidad del viento a dos diferentes alturas, de modo que se puede obtener la expresión mostrada en la ecuación 2 para la velocidad (u_2) a una altura (z_2), en función de la velocidad (u_1) a una altura (z_1) y de la longitud de rugosidad (z_0) del sitio particular.

$$u_2 = u_1 \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (2)$$

La longitud de rugosidad puede ser despejada de la ecuación 2 para obtener la expresión que se presenta en la ecuación 3.

$$z_0 = e^{\frac{u_2 \ln(z_1) - u_1 \ln(z_2)}{u_2 - u_1}} \quad (3)$$

En presencia de obstáculos prominentes tales como árboles, la altura de la Ley Logarítmica debe ser reemplazada por la expresión ($z - z_d$), tal como se muestra en la ecuación 4. El término (z_d) es conocido como altura de desplazamiento del plano cero [6].

$$u = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{k} \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) \quad (4)$$

Considerando que tanto la longitud de rugosidad como la altura de desplazamiento del plano cero se deben al terreno, en el caso de la primera debido al tipo de vegetación y en el caso de la segunda debido a obstáculos más grandes, es posible conceptualizar la suma de ambas como el punto donde inicia el perfil de velocidad vertical, como se muestra en la figura 1.

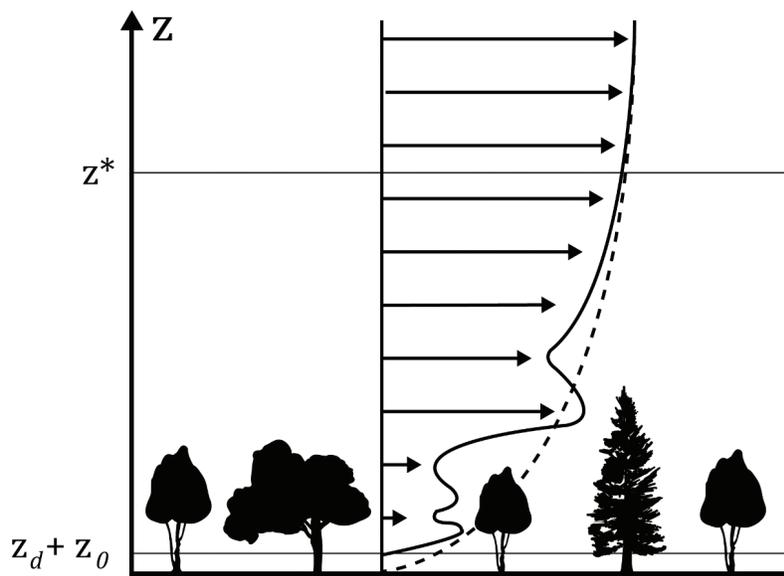


Figura 1. Perfil de viento vertical en una zona boscosa.

La altura mínima para la cual la ecuación 4 es válida, se identifica como (z^*) en la figura 1 y se denomina altura de difusión de estela, la cual marca la división entre la sub capa rugosa (en inglés buffer layer, transition layer o roughness sublayer -RSL-) y la sub capa inercial (en inglés logarithmic layer). Autores como Mertens [7] indican valores de (z^*) entre 34.5 y 39 m. A manera de referencia, en zonas urbanas (z_d) puede tomarse como tres cuartos del promedio de la altura de las edificaciones [4].

Otro modelo para el perfil de viento es conocido como la Ley de Potencia y se muestra en la ecuación 5. En este caso se relaciona la velocidad del viento con una velocidad de referencia (u_{ref}) a una altura de referencia (z_{ref}) y existe un exponente (α) que depende de la rugosidad del terreno, así como del rango de alturas. Resultados experimentales [8] indican que usualmente (α) = 1/7.

$$u = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (5)$$

Investigaciones en sitios específicos, que hacen uso de herramientas como redes neuronales, reportan modelos explícitos para (α) en función de la velocidad medida a una altura de referencia [9].

Existe una relación entre el exponente de la Ley de Potencia y la longitud de rugosidad de la Ley Logarítmica [4], como se muestra en la ecuación 6.

$$\alpha = \left(\frac{1}{\ln \left(\frac{h_{ref}}{z_0} \right)} \right) \quad (6)$$

Donde (h_{ref}) es la altura para la cual la ecuación 1 da el mismo resultado que la ecuación 5.

De los modelos presentados se extrae que la determinación de la longitud de rugosidad es fundamental para conocer el perfil de velocidad y estimar así el recurso eólico, sin embargo, distintas investigaciones señalan que la longitud de rugosidad es variable en muy distintos tipos de [10]-[12]. En el caso de [13] se analizan los efectos del cambio de la altura promedio de los árboles en la longitud de rugosidad y se encuentra que la relación entre estos términos es sumamente variable.

Por otra parte, para modelar el recurso eólico en general, más allá del perfil de velocidad, existen propuestas metodológicas para el mapeo mediante expresiones explícitas que consideran la forma y distribución de los obstáculos en el suelo [14], en sitios o regiones específicas, también modelos semi-empíricos que se alimentan de grandes cantidades de datos y diseñados específicamente para evaluar sitios de potencial para turbinas eólicas de pequeña escala [15]. Sin embargo, los métodos más usuales, requieren de la caracterización de la estructura completa del terreno, específicamente de la altura de los obstáculos como árboles en zonas boscosas [16], esto con herramientas muy avanzadas y costosas como mediciones láser conocidas como LiDAR (Del acrónimo en inglés Light Detection and Ranging) [17], o bien censado remoto en general [18], las cuales requieren de un alto costo de inversión.

Considerando la amplia variabilidad que existe en la literatura para el valor de (z_0) y lo distintos que pueden ser sus valores para un bosque, como se indica en el cuadro 1, el objetivo de esta investigación es contribuir al modelamiento del recurso eólico en un área boscosa tropical, proponiendo una expresión para (z_0) a partir de la velocidad del viento medida a una única

altura, cercana al suelo, para con ello poder describir el perfil de velocidad con un modelo dinámico, que dependa de una expresión variable de la longitud de rugosidad, sin el uso de equipos de alto costo.

Metodología

En esta investigación se trabajó con dos conjuntos de datos de velocidad del viento, provenientes de diferentes fuentes, tomados en el mismo punto a 1.5 y 10 metros de altura sobre el nivel del suelo. Se realizó la asociación de los datos en función del tiempo, con lo que se construyó una tabla con la velocidad del viento a dos alturas para cada momento del tiempo.

Se calculó la longitud de rugosidad para cada pareja de datos, empleando la ecuación 3. Luego se procesaron los datos con el software de inteligencia artificial Eureka, de Nutonian Inc., el cual permite encontrar una relación funcional entre las variables, usando una técnica de búsqueda evolutiva llamada regresión simbólica. En diferentes escenarios se buscó obtener la longitud de rugosidad como una función de la velocidad del viento medida a 1.5 m de altura, para finalmente reemplazar el valor de (z_0) en la ecuación 3 y obtener una expresión dinámica para la velocidad del viento en el eje vertical en función únicamente de una velocidad y altura de referencia, siendo independiente de un valor fijo de longitud de rugosidad.

Descripción de los datos

Los datos abarcan del 31 de agosto de 2011 al 2 de mayo de 2017, las variables fueron registradas 1 vez por hora. El punto de medición está en las coordenadas 09°51'08" N, 83°54'31" O, a 1360 metros sobre el nivel del mar. Lo que corresponde a una zona boscosa tropical.

Las mediciones a 10 m de altura sobre el suelo fueron adquiridas con una estación meteorológica marca Campbell Scientific, cuyo anemómetro mide la magnitud de la velocidad del viento en un rango de 0 m/s a 50 m/s con una precisión de ± 0.5 m/s y un valor umbral de 0.5 m/s. Estos datos fueron facilitados a los autores por el Instituto Meteorológico Nacional, para fines únicamente de investigación.

Los datos a 1.5 metros sobre el suelo se tomaron con una estación meteorológica marca Davis, equipada con un anemómetro que mide magnitudes de la velocidad del viento en el rango de 0 m/s a 80 m/s con una precisión de ± 1 m/s, una resolución de 0.1 m/s y un valor umbral de 0.4 m/s. Estos datos fueron tomados directamente por personal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En ambas alturas se emplearon anemómetros de copas para determinar la velocidad del viento.

Pre procesamiento de los datos con Microsoft Excel y Matlab

Al tener dos fuentes de información de dos estaciones de distintos fabricantes, se requirió un pre proceso de ordenamiento, identificación y filtrado para tener los datos del mismo momento de tiempo para las dos alturas. Esto se hizo con un código programado en Matlab en el cual también se eliminaron todas las entradas de tiempo calmo, es decir de 0 m/s.

Con el procesamiento de datos en Matlab se identificaron y eliminaron todos los pares de datos en los que la velocidad del viento a 1.5 m era mayor que a 10 m de altura. Pues esa condición no coincide con el modelo logarítmico en el cual se basa este estudio.

Luego se calculó el promedio simple de los datos y la desviación estándar, adicionalmente para cada momento del tiempo se calculó la longitud de rugosidad, empleando la ecuación 3.

El último paso en el pre procesamiento fue clasificar, en Microsoft Excel, los datos según su fecha como valores en el día o la noche y en estación seca o lluviosa. Se consideró el día en horario de 6 am a 5:59 pm. El resto es la noche. No se hace distinción alguna de los cambios en el horario de salida y puesta del sol en el punto de medición, a lo largo del año, pues al estar cerca del ecuador terrestre, estos cambios son despreciables. Por otro lado, la estación seca se consideró desde diciembre hasta abril y la lluviosa de mayo a noviembre.

Procesamiento de los datos mediante regresión simbólica

Una vez construida una tabla con las columnas: fecha, hora, estación (seca o lluviosa), horario (diurno/nocturno), velocidad del viento a 1.5 m de altura (m/s), velocidad del viento a 10 m de altura (m/s) y longitud de rugosidad (m), se exportaron las tablas de datos a Eureka y se definió una búsqueda de una relación funcional expresada en la ecuación 7, donde (u_1) se refiere a la velocidad del viento medida a 1.5 m de altura sobre el suelo.

$$z_0 = f(u_1) \tag{7}$$

Por la naturaleza del fenómeno, se incluyó entre los bloques de búsqueda de Eureka las operaciones básicas: suma, resta, multiplicación y división; además de las operaciones más complejas como el exponencial, el logaritmo, raíces, potencias y factoriales. No se consideraron las funciones trigonométricas al ser conocido que el fenómeno no es oscilatorio, de acuerdo con los modelos encontrados en la literatura y presentados en la introducción.

Se realizaron nueve búsquedas de la relación funcional de la ecuación 7, considerando la segregación de datos que se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Conjuntos de datos seleccionados para cada búsqueda del modelo de la longitud de rugosidad.

Filtrado en los datos	Número de búsqueda	Codificación del modelo
Ninguno (Todos los datos son considerados)	1	Total
Horario diurno	2	Día
Horario nocturno	3	Noche
Estación seca	4	Seca
Estación lluviosa	5	Lluviosa
Horario diurno y estación seca	6	Día-Seca
Horario diurno y estación lluviosa	7	Día-Lluviosa
Horario nocturno y estación seca	8	Noche-Seca
Horario nocturno y estación lluviosa	9	Noche-Lluviosa

Se empleó la plataforma Windows Azure como recurso de computación en la nube, debido a la gran demanda de recursos que representa Eureka, permitiendo correr el programa por varios días para cada búsqueda, sin comprometer los resultados por posibles interrupciones.

Para cada búsqueda del cuadro 2 se ejecutó Eureka hasta lograr convergencia en el error absoluto medio en los modelos de regresión simbólica.

Análisis y resultados

Al calcular el promedio simple de todos los resultados puntuales de longitud de rugosidad, se obtiene que $(\bar{z}_0) = 0.577$ con una desviación estándar de 0.495, por lo cual, se ve la necesidad de un modelo para esta variable, considerando que la desviación es casi del tamaño del promedio. A la vez, se encuentra que los datos son consistentes con la literatura, pues al comparar el promedio obtenido con los valores del cuadro 1, se encuentra que el orden de magnitud para bosque es el correcto.

Los resultados se presentan en dos grupos, en primera instancia se muestran los modelos generales de longitud de rugosidad obtenidos según las nueve búsquedas descritas en la metodología.

Luego, a la luz de los resultados mismos, se repite el proceso de búsqueda acotando la función objetivo, eliminando el logaritmo natural, el factorial, la potencia y la raíz; conservando únicamente la función exponencial, junto con las operaciones básicas. Con esta iteración se obtienen los denominados modelos exponenciales.

Finalmente, se presenta la propuesta de modelo dinámico de velocidad del viento en función de la altura, para la zona boscosa tropical específica de este estudio.

Modelos generales para z_0

Siguiendo la metodología, al correr Eureka según las nueve búsquedas detalladas en el cuadro 2, se obtienen los nueve modelos que se detallan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Modelos generales para la longitud de rugosidad.

Codificación del modelo	Modelo $z_0 =$	Coefficiente de correlación	Error absoluto promedio
Total	$e^{\frac{0.106 - 0.732u_1}{u_1 + 0.263}}$	0.922	0.130
Día	$\frac{1.99}{1.22 + u_1} - 0.263$	0.832	0.130
Noche	$1.56 + u_1 - 1.93u_1^{0.749}$	0.887	0.131
Seca	$0.104 + (3.38u_1)^{(-0.173 - 0.284u_1)}$	0.896	0.109
Lluviosa	$\frac{1.91}{1.13 + u_1} - 0.278$	0.859	0.143
Día-Seca	$\frac{2.48}{2.31 + u_1^2}$	0.808	0.102
Día-Lluviosa	$\frac{2.42}{1.33 + u_1} - 0.329$	0.828	0.139
Noche-Seca	$(0.263u_1 - 0.604)! - 0.77$	0.826	0.114
Noche-Lluviosa	$\frac{2.11}{1.18 + u_1} - 0.345$	0.861	0.143

Considerando, por un lado, que los modelos ofrecen una amplia variabilidad de funciones y que el modelo con el total de los datos es el que posee un mayor coeficiente de correlación, sin sacrificar el error absoluto promedio; por otro lado, que el modelo Total tiene una estructura muy similar a la ecuación 3, se repite el proceso de búsqueda eliminando del motor de Eureka las funciones logaritmo natural, factorial, potencia y la raíz. Con esto se obtienen los modelos exponenciales, que se detallan a continuación.

Modelos exponenciales z_0

Al repetir el proceso de búsqueda funcional descrito en la metodología, pero eliminando las funciones logaritmo natural, factorial, potencia y la raíz, se obtienen los nueve modelos exponenciales mostrados en el cuadro 4.

Cuadro 4. Modelos exponenciales para la longitud de rugosidad.

Codificación del modelo	Modelo $z_0 =$	Coefficiente de correlación	Error absoluto promedio
Total	$e^{\frac{0.106 - 0.732u_1}{u_1 + 0.263}}$	0.922	0.130
Día	$0.111 + \frac{1.38 + 2.05u_1^2}{e^{1.83u_1}}$	0.832	0.129
Noche	$0.125 + \frac{1.14}{u_1 + 0.858e^{0.375u_1^2}}$	0.887	0.131
Seca	$0.0864 + \frac{2.74}{1.01 + u_1 + e^{u_1}}$	0.896	0.110
Lluviosa	$\frac{0.111}{0.2 + u_1} + e^{-0.634u_1}$	0.860	0.143
Día-Seca	$0.0884 + \frac{2.8}{1.56 + e^{u_1}}$	0.811	0.102
Día-Lluviosa	$0.0145 + \frac{1.07u_1}{e^{u_1} - 1.03}$	0.829	0.138
Noche-Seca	$0.133 + \frac{1.32}{u_1 + e^{0.396u_1^2}}$	0.909	0.114
Noche-Lluviosa	$\frac{0.428 + 0.832u_1}{e^{u_1} - 0.714}$	0.861	0.142

Con el objetivo de determinar si los modelos exponenciales representan una mejora respecto de los generales, se muestra en las gráficas 2 y 3 la comparación de los coeficientes de correlación y el error absoluto promedio para los modelos generales y exponenciales. En la figura 2 destaca que, en los modelos exponenciales, el coeficiente de correlación aumenta levemente respecto de los modelos generales. En la figura 3 se presenta una disminución del error absoluto promedio, por lo que se puede afirmar que los modelos exponenciales del cuadro 4 resultan más adecuados para describir el fenómeno. El modelo exponencial para la búsqueda 8, correspondiente a Noche-Seca, experimenta un aumento significativo en cuanto a coeficiente de correlación, respecto del modelo general. Esto sitúa al modelo Noche-Seca fuera de la tendencia, la cual es un ligero aumento en el coeficiente de correlación.

Como se evidencia en estos resultados, los modelos segregados tienen menor coeficiente de correlación que el modelo que contempla el total de los datos. Esto se debe a que al segregar los datos se pierde la continuidad del fenómeno en estudio, lo que genera una disminución en la correlación del modelo.

Por lo anterior, se opta por emplear un único modelo para todo momento del tiempo y para todas las posibles condiciones como día, noche, estación lluviosa o seca. Esto resulta particularmente conveniente pues permite describir la velocidad del viento sin tomar en cuenta parámetros adicionales.

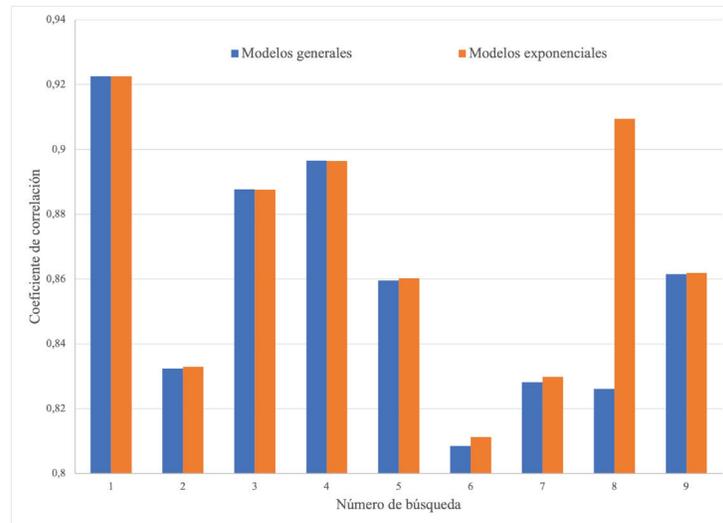


Figura 2. Comparación del coeficiente de correlación entre los modelos generales y exponenciales.

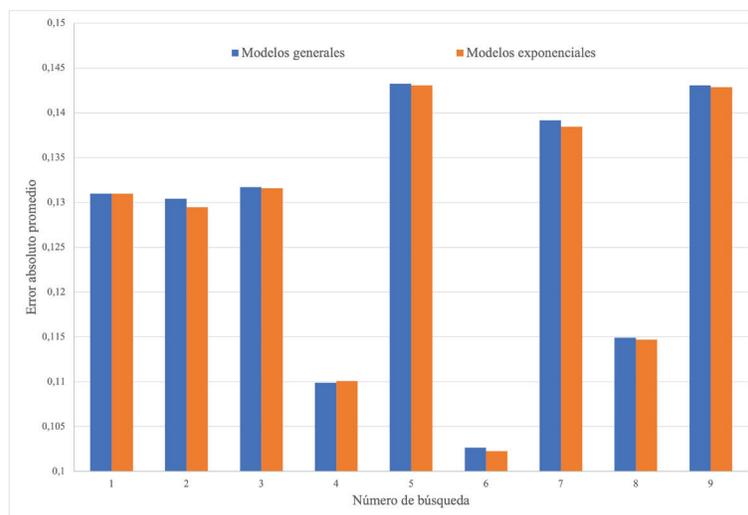


Figura 3. Comparación del error absoluto promedio entre los modelos generales y exponenciales.

Modelo dinámico de la velocidad del viento

Considerando los resultados de los modelos exponenciales, se encuentra que la expresión para (z_0) con mayor coeficiente de correlación es el modelo que considera todos los datos, lo que resulta conveniente pues una misma expresión puede emplearse para describir el fenómeno de velocidad del viento, en todo momento.

Si se toma la ecuación 2 y se reemplaza (z_0) por la expresión obtenida en la búsqueda 1, se obtiene la ecuación 8, que permite calcular la velocidad del viento (u_2) a una altura cualquiera (z_2) en función de la velocidad del viento (u_1) a una altura (z_1), pero independiente de la longitud de rugosidad, para el sitio particular.

$$u_2 = u_1 \frac{\ln(z_2) - \frac{0.106 - 0.732u_1}{u_1 + 0.263}}{\ln(z_1) - \frac{0.106 - 0.732u_1}{u_1 + 0.263}} \quad (8)$$

La ecuación 8 se ha indicado como el modelo dinámico de la velocidad del viento, pues considera el valor de la longitud de rugosidad como una variable, que toma determinados valores en función de la propia velocidad del viento de referencia, es decir, el (z_0) deja de ser una constante en esta propuesta y ahora es un valor dinámico.

Esta propuesta comprende de alguna manera los valores distintos que ofrece la literatura para la longitud de rugosidad.

Ahora bien, en el caso de los datos analizados, (z_1) = 1.5 m y se han obtenido las constantes de la ecuación 8, pero de manera general, se puede plantear la ecuación 9, en función de tres parámetros a, b, c. Lo cual representa la posible aplicación de esta propuesta para otros escenarios, donde sería necesario determinar estos tres parámetros.

$$u_2 = u_1 \frac{\ln(z_2) - \frac{a - b u_1}{u_1 + c}}{\ln(z_1) - \frac{a - b u_1}{u_1 + c}} \quad (9)$$

Una comparación rápida de la ecuación 2 con la ecuación 9 haría pensar que se pasó de no conocer (z_0) a no conocer tres parámetros, lo que a primera vista complicaría innecesariamente el análisis. Sin embargo, con esta formulación se ha reemplazado el valor constante de (z_0) por un conjunto de parámetros que capturan la naturaleza variable de (z_0), la cual ha sido identificado como tal en la literatura, por lo tanto, este procedimiento puede ser replicado en otras localidades para describir el perfil de velocidad de viento a baja altura.

Conclusiones

En esta investigación se desarrolló un modelo para la velocidad del viento en el eje vertical, sustituyendo el valor clásico de la longitud de rugosidad, por una expresión dinámica que depende de la velocidad del viento, lo cual captura el resultado de varias investigaciones que mencionan precisamente que el (z_0) no es una constante.

El modelo propuesto en la ecuación 9 es válido para todas las estaciones del año y los posibles escenarios como horario diurno y nocturno. Intentar obtener modelos segregados implica interrumpir la continuidad del fenómeno y se traduce en una reducción en la correlación del modelo.

La expresión para la velocidad del viento que se propone, no depende directamente de la longitud de rugosidad sino de tres parámetros, que para cualquier otra localidad deberán ser determinados experimentalmente y que capturan el efecto variable de la longitud de rugosidad.

Con la metodología propuesta en esta investigación es posible conocer el valor de la velocidad del viento en el eje vertical, únicamente con realizar mediciones en un punto cercano al suelo, lo que permite conocer el recurso eólico sin necesidad de instalar equipos de gran envergadura.

Agradecimientos

Al Instituto Meteorológico Nacional y al Ing. Maikel Méndez Morales por facilitar los datos para esta investigación. A los estudiantes asistentes Emanuel Fallas y Gonzalo Madrigal por su colaboración con este documento. Al profesor Benito Stradi por el soporte con Cloud Computing. Al ITCR por el financiamiento mediante el proyecto: Optimización de un perfil aerodinámico de una turbina eólica de eje horizontal para aplicaciones de pequeña escala en zonas boscosas.

Referencias

- [1] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajya y V. H. Krishna, "A review on small scale wind turbines," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 56, pp. 1351-1371, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- [2] "Plan Nacional de Energía 2015-2030," MINAET, San José, Costa Rica, 2015.
- [3] FAO, *Situación de los bosques del mundo. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra*. Roma, Italia, 2016.
- [4] J. D. Holmes, *Wind loading of structures*, EUA: CRC Press, 2018.
- [5] T. Foken y C. J. Napo, *Micrometeorology*, vo1. 2, Berlin, Alemania: Springer.
- [6] K. Sunderland, T. Woolmington, J. Blackledge y M. Conlon, "Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction," *J. Wind. Eng. Ind.*, vol. 121, pp. 70-81, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.001>
- [7] S. Mertens, "Book Review: Wind Energy in the Built Environment —Concentrator Effects of Buildings," *Wind. Eng.*, vol. 30, n. 5, pp. 451-452, 2006, doi: <http://dx.doi.org/10.1260/030952406779502623>
- [8] W. Tong, "Fundamentals of wind energy", en *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, CIUDAD, PAÍS: WIT Press, 2010, pp 1-44.
- [9] M. Beccali, G. Cirrincione, A. Marvuglia y C. Serporta, "Estimation of wind velocity over a complex terrain using the Generalized Mapping Regressor", *Appl. Energy*, vol. 87, n. 3, pp. 884-893, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.026>
- [10] L. Kang, J. Zhang, X. Zou, H. Cheng, C. Zhang y Z. Yang, "Experimental investigation of the aerodynamic roughness length for flexible plants," *Bound.-Layer Meteorol.*, vol. 172, n. 3, pp. 397-416, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00449-0>
- [11] A. Rigden, D. Li y G. Salvucci, "Dependence of thermal roughness length on friction velocity across land cover types: A synthesis analysis using AmeriFlux data," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 249, pp. 512-519, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.003>
- [12] E. S. Miles, J. F. Steiner y F. Brun, "Highly variable aerodynamic roughness length (z_0) for a hummocky debris-covered glacier," *J. Geophys. Res.*, vol. 122, n. 16, pp. 8447-8466, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/2017JD026510>
- [13] K. D. Maurer, B. S. Hardiman, C. S. Vogel y G. Bohrer, "Canopy-structure effects on surface roughness parameters: Observations in a Great Lakes mixed-deciduous forest," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 177, pp. 24-34, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.002>
- [14] J. T. Millward-Hopkins, A. S. Tomlin, L. Ma, D. B. Ingham y M. Pourkashanian, "Mapping the wind resource over UK cities," *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 202-211, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.039>
- [15] S. M. Weekes y A. S. Tomlin, "Evaluation of a semi-empirical model for predicting the wind energy resource relevant to small-scale wind turbines," *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 280-288, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.053>

- [16] L. É. Boudrealt, A. Bechmann, N.N. Sørensen, A. Sogachev y E. Dellwik, "Canopy structure effects on the wind at a complex forested sites," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 524, no. 1, p. 012112, 2014, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012112>
- [17] L. É. Boudrealt, A. Bechmann, L. Tarvainen, L. Klemedtsson, I. Shendryk y E. Dellwik, "A LiDAR method of canopy structure retrieval for wind modeling of heterogeneous forests," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 201, pp. 86-97, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.014>
- [18] D. Hu, S. Cao, S. Chen y N. Feng, "Mapping aerodynamic roughness length with multi-source remote sensing data," en *2016 4th. Int. Workshop on Earth Obs. Remote Sens. App. (EORSA)*, 2016, pp. 373-376, doi: <https://doi.org/10.1109/EORSA.2016.7552832>

Implementación de metodologías analíticas para la caracterización de aguas geotérmicas para aplicación en usos directos

Implementation of analytical methodologies for characterization of geothermal waters for direct uses

Diana Robles-Chaves¹, Olman Alberto Arias-Molina²

Fecha de recepción: 3 de marzo de 2021

Fecha de aprobación: 18 de julio de 2021

Robles-Chaves, D; Arias-Molina, O. A. Implementación de metodologías analíticas para la caracterización de aguas geotérmicas para aplicación en usos directos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 16-26.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5561>

- 1 Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad. Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: drobles@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-8173-9610>
- 2 Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Costa Rica. Correo electrónico: oariasm@ice.go.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8870-9476>



Palabras clave

Agua geotermal; exploración; geoquímica; geotermómetro; validación; robustez; Costa Rica.

Resumen

En Costa Rica se han identificado importantes campos geotermales con temperaturas inferiores a los 150 °C, que han sido poco explorados, y su uso es prácticamente exclusivo para baños termales; dejándose de lado importantes aplicaciones en usos directos donde se utiliza el calor de este recurso, para sistemas de climatización, acuicultura, deshidratación, entre otros. En esta investigación, se seleccionaron seis sitios de agua geotérmica en la zona de Cartago con temperaturas superficiales en un rango entre (43 - 61) °C, y se determinó que la totalidad de las muestras son clasificadas como aguas salobres con una composición predominante de tipo ($\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$) o ($\text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$), las cuales podrían presentar problemas de corrosión o incrustación. Se estimó que el geotermómetro de SiO_2 es el más adecuado para estimar las temperaturas del reservorio las cuales se encuentran en el rango entre (75 - 83) °C. La validez de las metodologías analíticas empleadas fue demostrada realizando enriquecimientos con material de referencia en esta matriz, obteniéndose porcentajes de recuperación entre (85-119)%.

Keywords

Geothermal water; exploration; geochemistry; geothermometer; validation; ruggedness; Costa Rica.

Abstract

In Costa Rica, important geothermal fields were found with temperatures below 150 °C. There has been little exploration in this fields and their use are exclusively for thermal baths. Excluding important applications in direct uses, such as air conditioning systems, aquaculture, dehydration, among others. Six geothermal water sites were selected in Cartago with surface temperatures between (43 - 61) °C. All the samples studied are classified as brackish waters with a predominant composition of ($\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$) or ($\text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$), which could present corrosion or scaling problems. The SiO_2 geothermometer is the most suitable for estimating the reservoir temperature which are in the range between (75 - 83) °C. The analytical results were validated by recovery tests with reference material on the matrix under study, obtaining recovery percentages between (85-119) %.

Introducción

El rápido incremento de la población, ha ocasionado un aumento en el requerimiento energético y con ello un aumento de las emisiones dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero, considerados entre los principales causantes del cambio climático. Es por esto, que se ha promovido la investigación en energías limpias, como es la hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, biomásica y oceánica, las cuales permiten reducir el uso de combustibles fósiles. [1] [2]

En lo que respecta a energía geotérmica, esta es utilizada y clasificada según la temperatura del reservorio; se habla de geotermia de muy baja temperatura cuando la temperatura es < 25 °C, baja temperatura (25-90) °C, temperatura media (90-150) °C y temperaturas altas con $T > 150$ °C. [3] En el caso de Costa Rica el uso mayoritario se da en los fluidos termales de alta temperatura para la generación de energía eléctrica; los fluidos de baja y media temperatura

son utilizados exclusivamente en balneología, [4] desaprovechándose importantes alternativas para el uso de este calor, ya que estos fluidos tienen la ventaja de presentar temperaturas constantes a lo largo del año, al no verse afectados por los cambios estacionales. [5]

A nivel mundial se han desarrollado diversos usos directos para el agua termal, tanto en sistemas abiertos como cerrados. Entre ellos se menciona la climatización de espacios con aire acondicionado o calefacción, control de temperatura en invernaderos en donde permite mejorar la eficiencia de las cosechas y la producción de cultivos en zonas no endémicas. [6] También se utiliza en procesos productivos como acuicultura de trucha, salmón, tilapia, langosta, entre otros, así como, en la deshidratación de frutas y vegetales, que permite aumentar la vida útil de estos productos. [7]

Para poder hacer uso del calor presente en el agua termal, es necesario conocer la composición del fluido, sus características y la temperatura del reservorio; esto permite definir los materiales que se deben utilizar y evaluar la factibilidad del sistema; esta etapa permite reducir costos de perforación y exploración. [8] Para esto, se utilizan geotermómetros que son ecuaciones que emplean la concentración de ciertos elementos para estimar la temperatura del reservorio. [9] Existe gran cantidad de geotermómetros desarrollados a lo largo del tiempo, los cuales son aplicables en diferentes rangos de temperaturas y bajo diversas condiciones de equilibrio entre el agua termal y las rocas. [10]

Se utilizan también en la fase de exploración diagramas triangulares de aniones y cationes que permiten trazar los orígenes de las fuentes, así como, conocer los principales procesos geoquímicos que ocurren. [10] Entre los diagramas ternarios más utilizados se encuentra el de Na–K–Mg propuesto por Giggenbach (1988), el cual permite evaluar el equilibrio agua–mineral e identificar el tipo de aguas entre completamente equilibradas, parcialmente equilibradas (mezcladas) o inadecuadas y permite estimar la temperatura del reservorio. [11] El diagrama ternario de Cl–SO₄–HCO₃ (Giggenbach 1991) permite relacionar el contenido de estos aniones con los procesos que experimenta el fluido en su ascenso a la superficie; clasificando los yacimientos termales en origen volcánico si la composición es elevada en sulfatos, maduras si poseen elevado contenido de cloruros, pluvial (periféricas) si presentan contenidos importantes de carbonato/bicarbonato o calentadas por vapor geotérmico. [12]

En este estudio se lleva a cabo una verificación de las metodologías analíticas empleadas en el análisis de agua termal, que permite validar los resultados obtenidos, así como la caracterización fisicoquímica de las aguas ubicadas en la zona de Cartago. Esto con el fin de conocer el origen de las fuentes y evaluar su posible potencial para implementar usos directos con este recurso.

Materiales y métodos

Sitios de muestreo

Para este estudio se llevó a cabo la recolección de seis muestras de origen geotermal en la zona de Cartago; se seleccionaron estos sitios ya que se ubican en las cercanías a zonas hoteleras donde la geotermia de baja entalpía podría tener importantes aplicaciones.

Recolección y composición química de las aguas

Para la recolección y análisis de las muestras se utilizó las metodologías analíticas propuestas en el Standard methods for the examination of water and wastewater [13], pero debido a que estas no son propias para la matriz en estudio se realizaron pruebas de robustez con el fin de evaluar si son apropiadas.

En el sitio de muestreo se realizó la determinación de temperatura, conductividad y pH. Luego de la recolección de las muestras, se realizó una filtración al vacío empleando un filtro de 0,45 µm. Las muestras fueron almacenadas en refrigeración a una temperatura < 4°C y aquellas utilizadas para el análisis de metales se preservaron añadiendo ácido nítrico (HNO₃) hasta pH < 2. La determinación de cloruros (Cl⁻) se realizó mediante un método volumétrico utilizando una disolución de nitrato de plata (AgNO₃) 0,01 mol/L y cromato de potasio (K₂CrO₄) como indicador. Las concentraciones de carbonato (CO₃²⁻) y bicarbonato (HCO₃⁻) fueron determinadas mediante valoración con ácido clorhídrico (HCl) 0,1 mol/L utilizando como indicadores fenolftaleína y la mezcla de verde de bromocresol y rojo de metilo. La concentración de sulfato (SO₄²⁻) se analizó mediante un método turbidimétrico con cloruro de bario (BaCl₂) a una absorbancia de 420 nm. El sílice soluble (SiO₂) fue determinado por colorimetría con molibdato de amonio ((NH₄)₆Mo₇O₂₄) y el boro (B) para generar color con reactivo de carmín. Para estas metodologías se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis marca Thermo Scientific.

Las concentraciones de calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), potasio (K⁺), sodio (Na⁺), hierro total (Fe) y manganeso total (Mn) fueron determinadas por espectrofotometría de absorción atómica de llama utilizando un equipo marca PerkinElmer modelo AAnalyst 800. La determinación de arsénico total (As) y Litio (Li⁺) también se realizaron con este equipo, pero por la técnica de horno de grafito.

Verificación de las metodologías

Para los estudios de robustez se realizaron enriquecimientos con material de referencia certificado sobre matriz de agua geotermal para los componentes mayoritarios. Se estableció como criterio para considerar que las metodologías eran adecuadas un porcentaje recuperación entre (80-120) %. Para este estudio se seleccionaron al menos 2 fuentes de agua termal diferentes y se aplicaron recuperaciones en ambas. [14]

Adicionalmente, se analizó la precisión en los análisis, para lo cual, todas las muestras fueron analizadas por duplicado y se estableció como criterio de aceptación un coeficiente de variación < 10 %. [14]

Análisis de los datos

Para asegurar la validez de los resultados obtenidos se realizó un análisis de balance iónico mediante la fórmula (1), donde el error de balance iónico para aguas de tipo termal usualmente se considera apropiado si es inferior al 10 %. [15]

$$\% \text{ Balance} = \left[\frac{\sum(m_i z_i)_{\text{cationes}} - \sum(m_i z_i)_{\text{aniones}}}{[\sum(m_i z_i)_{\text{cationes}} + \sum(m_i z_i)_{\text{aniones}}] \div 2} \right] * 100 \quad (1)$$

El cálculo de balance iónico y la elaboración de diagramas ternarios se realizó con la hoja de cálculo desarrollada por la Universidad de Standford [16], y la estimación de la temperatura de los reservorios mediante geotermómetros se utilizó el programa SolGeo [17] que permite estimar porcentajes de error.

Con el fin de estimar la capacidad de corrosión e incrustaciones a partir de la química de aguas obtenida, se utilizó el índice de saturación de Langelir (LSI) fórmula (2) [18]

$$LSI = pH - pHs \quad (2)$$

$$pHs = -\log \left\{ \frac{K_{a2} * \gamma_{Ca^{2+}} * [Ca^{2+}] * \gamma_{HCO_3^-} * [HCO_3^-]}{K_{sp}} \right\} \quad (3)$$

Donde:

K_{a2} : constante de equilibrio de disociación del bicarbonato

γ : coeficientes de actividad

K_{sp} : constante del producto de solubilidad de carbonato de calcio (CaCO_3).

Los resultados obtenidos mediante estas fórmulas fueron interpretados según la escala que se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación según índice de Langelier. [19].

LSI	
LSI < 0	Aguas no saturadas en CaCO_3 , que tiene tendencia a generar corrosión.
LSI = 0	Agua en equilibrio, no existe corrosión ni incrustaciones.
LSI > 0	Agua sobresaturada en CaCO_3 , con formación de incrustaciones.

Los análisis fisicoquímicos fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) del Tecnológico de Costa Rica.

Resultados y discusión

La figura 1 muestra la ubicación de los sitios de muestreo en la zona de Cartago. El punto denominado RP1 se ubica en las cercanías al río Agua Caliente y a la construcción de un proyecto hotelero. Los puntos de muestreo denominados RP2, RP3, RP4, RP5 y RP6 se encuentran dentro de las instalaciones del Hotel Río Perlas en Dulce Nombre.

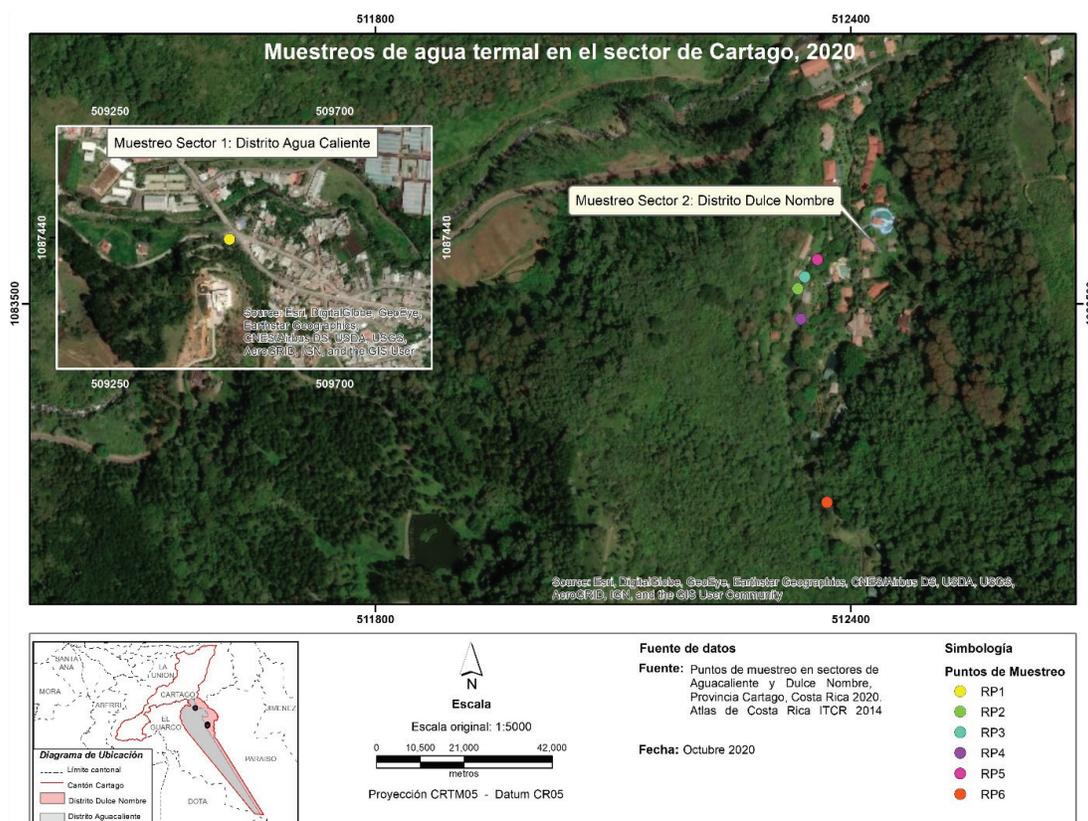


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreos de agua termal.

El cuadro 2 muestra los resultados obtenidos en el análisis fisicoquímico de la composición de las aguas de origen termal para los compuestos mayoritarios y el cuadro 3 algunos elementos minoritarios.

Cuadro 2. Composición mayoritaria de aniones y cationes en las aguas termales.

Muestra	pH	Temp. (°C)	Conductividad (µS/cm)	Sólidos disueltos (mg/kg)	Cl ⁻ (mg/kg)	CO ₃ ²⁻ (mg/kg)	HCO ₃ ⁻ (mg/kg)	SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	Na ⁺ (mg/kg)	K ⁺ (mg/kg)	Ca ²⁺ (mg/kg)	Mg ²⁺ (mg/kg)	Dureza (mg/kg)
RP1	6,33	44,8	4 910	2 412	485	< 1	745	459	681	40	182	32	586
RP2	8,43	60,7	3 103	1 430	68	< 1	19	870	267	6	184	0,12	460
RP3	8,40	53,1	2 699	1 356	64	< 1	9	819	298	6	175	0,30	438
RP4	7,17	42,1	2 319	1 372	62	< 1	14	784	267	16	171	0,81	428
RP5	8,22	45,7	2 566	1 431	68	< 1	18	924	306	8	184	0,21	460
RP6	8,40	43,2	2 319	1 232	58	< 1	21	846	327	5	150	0,14	375

Cuadro 3. Composición de elementos minoritarios en las aguas termales.

Muestra	Manganeso (mg/kg)	Hierro (mg/kg)	Boro (mg/kg)	Arsénico (mg/kg)	Sílice (mg/kg)	Litio (mg/kg)
RP1	< 0,09	< 0,2	1,6	0,24	32	0,460
RP2	< 0,09	< 0,2	1,5	< 0,005	31	0,056
RP3	< 0,09	< 0,2	1,8	< 0,005	30	0,057
RP4	0,12	0,20	1,4	< 0,005	28	0,054
RP5	< 0,09	< 0,2	2,1	< 0,005	29	0,061
RP6	0,15	< 0,2	1,8	< 0,005	27	0,061

El rango de temperaturas superficiales encontrado va de (42 a 61) °C, siendo la mayor temperatura encontrada en RP2 en el distrito de Dulce Nombre. Se detectó también que las muestras recolectadas en Dulce Nombre tienen pH más alcalino que la recolectada en Agua Caliente.

El cuadro 4 evidencia que los porcentajes de error del balance iónico obtenido son < 10 % por lo que los datos son adecuados para ser utilizados al realizar análisis geotérmicos.

Cuadro 4. Balance iónico obtenido por muestra.

Muestra	Error balance iónico (%)
RP1	9
RP2	2
RP3	7
RP4	6
RP5	3
RP6	5

El cuadro 5 muestra los rangos de recuperación obtenidos para cada parámetro evaluado al realizar el enriquecimiento sobre matriz. Los cuales se encuentran entre (80-120) % con lo que se confirma la validez de las metodologías analíticas empleadas para las aguas termales en estudio.

Cuadro 5. Porcentaje de recuperación obtenido en el ensayo de robustez para evaluar el efecto de la matriz.

Parámetro	Recuperación (%)
Cloruros	(87 – 105)
Sulfatos	(106 - 111)
Sodio	(88 - 116)
Potasio	(99- 114)
Calcio	(96- 106)
Magnesio	100
Manganeso	(88 - 119)
Hierro	(85 - 101)
Arsénico	(94 – 103)

Mediante el diagrama de Piper (figura 2) se pudo clasificar las aguas según la composición de los cationes y aniones mayoritarios, en este caso se evidencian dos grupos. La muestra RP1 se clasifica como $(\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+)$, mientras que las muestras RP2, RP3, RP4, RP5 y RP6 se clasifican como $(\text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+)$.

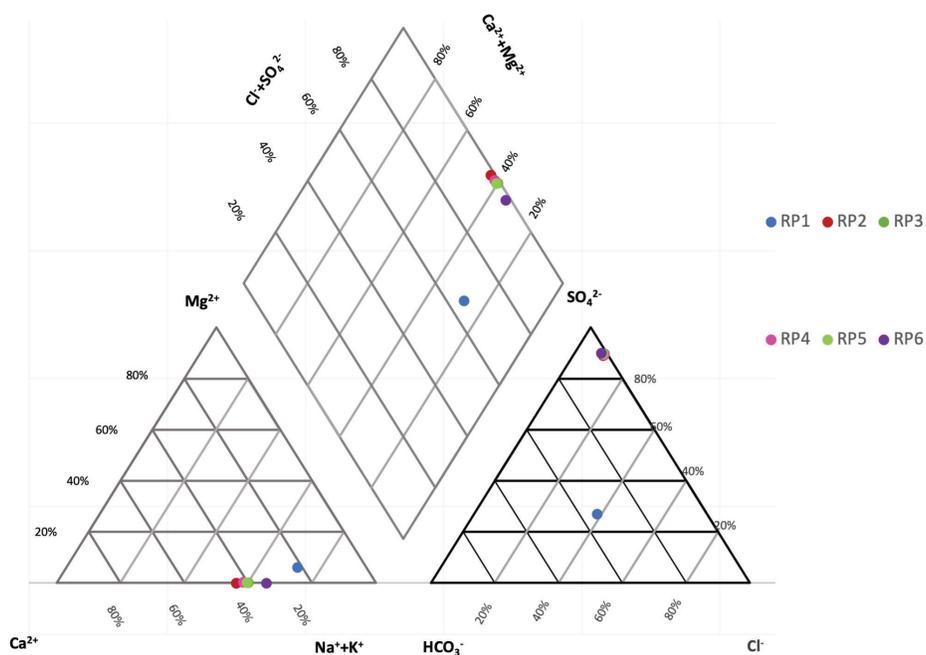


Figura 2. Diagrama de Piper que muestra la variabilidad de las muestras en las zonas de estudio.

En el diagrama ternario de $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$ que se muestra en la figura 3, se observa que la mayoría de las muestras son sulfatadas, esto indica que son muestras inmaduras, cercanas a la fuente de calor, mientras que, la muestra RP1 es clasificada como agua periférica, por su elevado contenido de bicarbonato, la cual a pesar de que han interactuado con la roca no alcanzan el equilibrio [11].

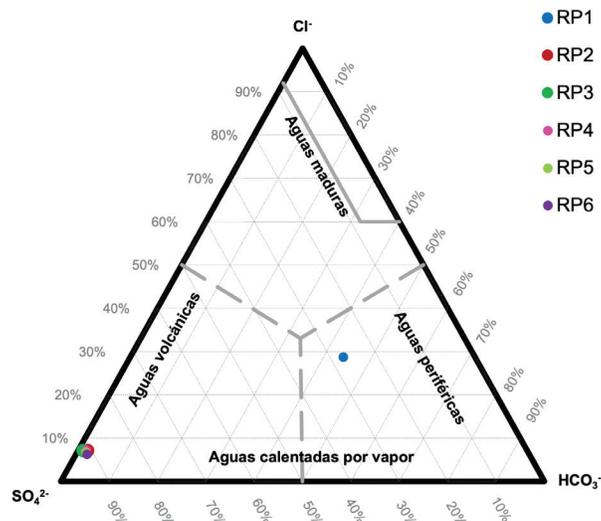


Figura 3. Diagrama ternario Cl-SO₄-HCO₃.

En la figura 4 se evidencia el diagrama ternario de Na-K-Mg donde se puede clasificar la muestra RP1 como agua inmadura, que presentan una importante mezcla con aguas superficiales y que su origen está relacionado a un reservorio de baja o mediana entalpía. Es importante indicar que al ser aguas que no han alcanzado el equilibrio pueden presentarse reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos, por lo que, para este tipo de aguas no es recomendable aplicar geotermómetros catiónicos [20]; por otro lado, se ubica otro grupo que corresponde a aguas parcialmente equilibradas al cual pertenecen las muestras restantes, estas presentan un rango de temperaturas entre (110- 140) °C, excepto la muestra identificada como RP4 que indica una temperatura de 200 °C aproximadamente.

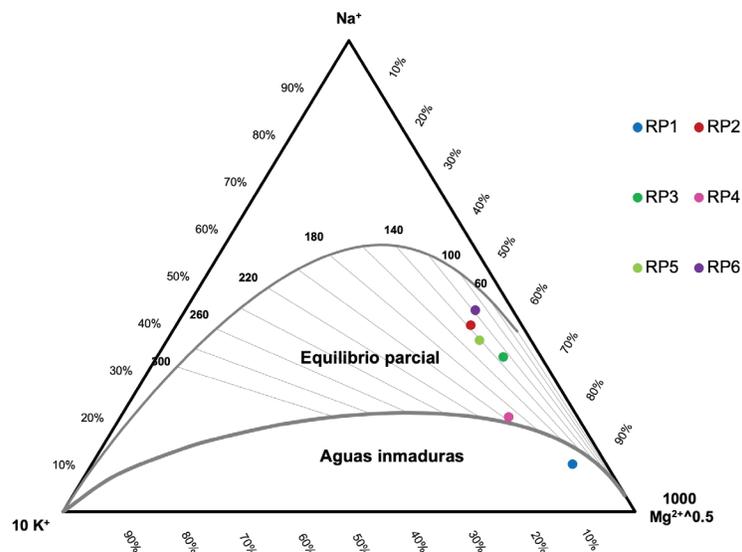


Figura 4. Diagrama ternario Na-K-Mg.

Según el contenido de sólidos totales disueltos (cuadro 2) todas las aguas fueron clasificadas como salobres, ya que presentan un contenido en el rango de (1 000 a 10 000) mg/kg. [21] Adicionalmente, al calcular la capacidad corrosiva o incrustante según el índice de saturación

de Langelier (LSI) se obtienen los resultados indicados en el cuadro 6. Estos resultados permiten identificar que en caso de implementar un sistema de intercambio de calor con estas aguas debe valorarse el material con el cual estará en contacto el agua termal, ya que en algunos casos puede generar problemas por corrosión o incrustaciones. También estos resultados permiten valorar la necesidad de añadir algún compuesto inhibidor que evite la precipitación de sales que ocasionen pérdidas en la eficiencia del proceso.

Cuadro 6. Índice de Langelier para los sitios en estudio.

Punto	LSI	Clasificación
RP1	-0,04	Aguas no saturadas que tiene tendencia a generar corrosión
RP2	0,84	Agua sobresaturada con formación de incrustaciones.
RP3	0,34	Agua sobresaturada con formación de incrustaciones.
RP4	-0,90	Aguas no saturadas que tiene tendencia a generar corrosión.
RP5	0,35	Agua sobresaturada con formación de incrustaciones.
RP6	0,48	Agua sobresaturada con formación de incrustaciones.

En esta investigación se emplearon diferentes geotermómetros para estimar la temperatura del reservorio y se comparó los porcentajes de error obtenidos utilizando el programa SolGeo, para evaluar cual es el más adecuado. En este caso los geotermómetros catiónicos, como es el de Na/K muestran porcentajes de error más elevados, ya que como se indicó anteriormente no son recomendados en sistemas que no se encuentran en el equilibrio. Por lo tanto, para este tipo de muestras se suelen utilizar los geotermómetros de sílice; los cuales tienen su fundamento según la fase predominante, ya sea cuarzo, calcedonia, cristobalita o sílice amorfa. [22] Las temperaturas obtenidas utilizando los geotermómetros de cuarzo son similares para todas las muestras, y son las que presentan los menores porcentajes de error en todos los sitios de muestreo. (cuadro 7)

Cuadro 7. Temperatura del reservorio según diversos geotermómetros.

Geotermómetro	Referencia	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6
SiO ₂	Verma and Santoyo 1997	83 (3)	82 (3)	80 (3)	77 (3)	79 (3)	76 (3)
SiO ₂	Fournier 1977	82	81	79	77	78	75
SiO ₂	Fournier and Potter 1982	83 (4)	81 (4)	80 (4)	77 (4)	79 (4)	76 (4)
Na-K-Ca	Fournier and Truesdell 1973	158	103	101	196	111	93
Na/K	Fournier 1979	175 (49)	115 (40)	110 (39)	177 (49)	121 (41)	96 (37)
Na/K	Díaz-González et al 2008	142 (10)	74 (8)	68 (7)	144 (10)	83 (8)	53 (7)
Na/K	Giggenbach 1988	193	136	130	194	144	117
Na/K	Arnórsson 2000	160	105	100	161	112	87
Na/K	Verma & Santoyo 1997	180 (39)	122 (32)	116 (31)	181 (39)	130 (33)	103 (30)

*Entre paréntesis se muestra el porcentaje de error para algunos geotermómetros utilizando el programa SolGeo [17].

Conclusiones y/o recomendaciones

Se demostró la validez de las metodologías analíticas mediante pruebas de robustez realizando enriquecimientos con material de referencia en la matriz de agua termal, obteniéndose porcentajes de recuperación en el rango de (85 – 119) %, lo que confirma que son adecuadas.

Se observó una importante variabilidad en los resultados obtenidos para los diferentes geotermómetros, pero al utilizar el programa SolGeo se evidencia que el de sílice muestra los menores porcentajes de error con un rango entre (3 – 4) %, por lo que resulta ser el más adecuado para estimar la temperatura a la que se encuentra cada uno de los reservorios.

El rango de temperaturas obtenido para los reservorios se encuentra entre (75 - 83) °C, lo cual indica que todas las aguas estudiadas son de baja temperatura, con la diferencia que la muestra RP1 se encuentra mezclada con aguas superficiales, mientras que las restantes cinco son aguas cercanas a la fuente de calor.

La caracterización realizada también permite evidenciar mediante el uso del Índice de Langelier que las muestras RP1 y RP4 pueden generar problemas de corrosión, mientras que las muestras RP2, RP3, RP5 y RP6 pueden generar problemas por la formación de incrustaciones por su alto contenido de sulfatos asociado a la proximidad con la fuente de calor. Es por esto que, en caso de implementar sistemas de uso directo, para extraer el calor del yacimiento se recomienda evaluar la posibilidad de utilizar inhibidores, que eviten daños en los intercambiadores de calor o en las tuberías en caso de utilizar acero, que disminuyan la eficiencia del sistema.

Referencias

- [1] D. Milenic, P. Vasiljevic y A. Vrajes, «Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes,» *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 649-657, 2010.
- [2] M. Sener y A. Baba, «Geochemical and hydrogeochemical characteristics and evolution of Kozakli geothermal fluids, Central Anatolia, Turkey,» *Geothermics*, vol. 80, pp. 69-77, 2019.
- [3] M. E. Carro Pérez, A. Peiretti y F. M. Francisca, «Energía geotérmica de baja entalpía en suelosLoéssicos: cálculo y diseño para caso de estudio,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 22, pp. 04-23, 2018.
- [4] G. E. Alvarado y A. G. Vargas, «Historia del descubrimiento y aprovechamiento de las fuentes termales en Costa Rica,» *Revista Geológica de América Central*, vol. 57, pp. 55-84, 2017.
- [5] H. Quick, J. Michael, U. Arslan y H. Huber, «Geothermal application in low-enthalpy regions,» *Renewable Energy*, vol. 49, pp. 133-136, 2013.
- [6] A. Jasso, «Invernadero geotérmico de baja entalpía para cultivo de Jitomates,» 2016. [En línea]. Available: <https://colecciondigital.cemiego.org/xmlui/handle/123456789/496>.
- [7] M. Van Nguyen, S. Arason, M. Gissurarson y P. Gunnar, «Uses of geothermal energy in food and agriculture. Opportunities for developing countries,» [En línea]. Available: FAO.
- [8] M. Battistel, S. Hurwitz, W. Evans y M. Barbieri, «The chemistry and isotopic composition of waters in the low-enthalpy geothermal system of Cimino-Vico Volcanic District, Italy,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 328, pp. 222-229, 2016.
- [9] R. Chandrajith, J. A. Barth, N. Subasinghe, D. Merten y C. Dissanayake, «Geochemical and isotope characterization of geothermal spring waters in Sri Lanka: Evidence for steeper than expected geothermal gradients,» *Journal of Hydrology*, vol. 476, pp. 360-369, 2013.
- [10] S. Chatterjee, U. K. Sinha, A. Jaryal y S. Patbaje, «Multicomponent Versus Classical Geothermometry: Applicability of Both Geothermometers in a Medium-Enthalpy Geothermal System in India,» *Aquatic Geochemistry*, vol. 25, pp. 91-108, 2019.
- [11] H. Chenaker, B. Houha y V. Vincent, «Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from north-eastern Algeria,» *Geothermics*, vol. 75, pp. 137-145, 2018.
- [12] O. Salas, «Aprovechamiento del recurso geotérmico en la estabilización de la temperatura del agua para el proceso de incubación de Alevines de tilapia en estanques con recirculación,» 2019.
- [13] APHA, Standard Methods for the examination of water and wastewater, vol. 23, R. B. Baird, A. D. Eaton y R. W. Eugene, Edits., Washington DC, 2017.
- [14] AOAC, Appendix F: Guidelines for Standard Method Performance Requirements, vol. 20, 2016.
- [15] J. Kania, «Geochemical interpretation of thermal fluids from low-temperature wells in Stykkishólmur, W-Iceland and Pyrzyce, NW-Poland,» de *Geothermal Trininng Programme*, Reykjavik, 2003.

- [16] T. Powell y W. Cumming, «Spreadsheets for geothermal water and gas geochemistry,» 2010. [En línea]. Available: <https://catalog.data.gov/dataset/spreadsheets-for-geothermal-water-and-gas-geochemistry-constructing-geothermometry-reports>. [Último acceso: 13 09 2020].
- [17] S. P. Verma, K. Pandarinath y E. Santoyo, «SolGeo: a new computer program for solute geothermometers and its application to Mexican geothermal fields. *Geothermics*,» *Geothermics*, vol. 37, nº 6, pp. 597-621, 2008.
- [18] A. Sharma, B. Agnihotri, S. Vemavarapu y A. B. Gupta, «Chemistry of inorganic scaling in full-scale reverse osmosis plants treating brackish groundwater,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, 2020.
- [19] Carrier Air Conditioning Com, Handbook of Air Conditioning System Design, New York: McGraw-Hill Books, 1965.
- [20] P. Hernández Morales y J. Wurl, «Hydrogeochemical characterization of the thermal springs in northeastern of Los Cabos Block, Baja California Sur, México,» *Environ Sci Pollut Res*, vol. 24, pp. 1384-13202, 2017.
- [21] M. O. Awaleh, T. Boschetti, A. E. Adaneh, M. A. Daoud, M. M. Ahmed, O. A. Dabar, Y. D. Soubaneh, A. D. Kawalieh y I. H. Kadieh, «Hydrochemistry and multi-isotope study of the waters from Hanlé-Gaggadé grabens (Republic of Djibouti, East African Rift System): A low-enthalpy geothermal resource from a transboundary aquifer,» *Geothermics*, vol. 86, 2020.
- [22] A. C. Cerpa, «Caracterización del potencial geotérmico a partir de análisis geoquímicos de fuentes termales, en el volcán Cerro Machín, Colombia,» 2018. [En línea]. Available: https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2250/1/CerpaAngie_2018_CaracterizacionPotencialGeotermico.pdf. [Último acceso: 25 10 2020].
- [23] W. D. Weight, Hydrogeology Field Manual, vol. 2, Mc Graw Hill, 2008.
- [24] S. Self, B. Reddy y M. Rosen, «Geothermal heat pump system: Status review and comparison with other heating options,» vol. 101, pp. 341-348, 2013Applied Energy.
- [25] M. P. Hochstein, «Assessment and Modelling of Geothermal Reservoirs (Small utilization Schemes),» *Geothermics*, vol. 17, nº 1, pp. 15-49, 1988.
- [26] A. K. Martínez Florentino, M. V. Esteller, E. Dominguez Mariani, J. L. Expósito y J. Paredes, «Hydrogeochemistry, isotopes and geothermometry of Ixtapan de la Sal-Tonatico hot springs, Mexico,» *Environmental Earth Sciences*, vol. 78, p. 600, 2019.

Presencia de microplásticos en especies marinas del Parque Nacional Marino las Baulas

Presence of microplastics in marine species of the Marine National Park las Baulas

Angélica Astorga-Pérez¹, Karol Ulate-Naranjo²,
Lilliana Abarca-Guerrero³

Fecha de recepción: 5 de febrero de 2021
Fecha de aprobación: 15 de junio de 2021

Astorga Pérez, A; Ulate-Naranjo, K; Abarca-Guerrero, L. Presencia de microplásticos en especies marinas del Parque Nacional Marino las Baulas⁴. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 27-38.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5466>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Química. Costa Rica.
Correo electrónico: angelica.astorga.perez@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-2373-0455>
- 2 Universidad Nacional, Escuela de Ciencia Biológicas. Costa Rica.
Correo electrónico: karol.ulate.naranjo@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5687-555X>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: lbarca@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5129-3104>
- 4 Este artículo está basado en la tesis de licenciatura de ingeniería ambiental de la primera autora. Disponible en: t.ly/jnPw

Palabras clave

Microplástico; pelágico; biota marina; carnívoros; digestión química.

Resumen

La ingesta de microplásticos (MPs) en diversas especies marinas ha sido reportada en la literatura, sin embargo, el grado de contaminación en los sistemas y la biota asociada a estos es poco conocido. En este estudio se presentan los resultados de la presencia de microplásticos en siete especies de peces pelágicos y de una especie de crustáceo bentónico, todos de alto nivel trófico del Parque Nacional Marino Las Baulas.

Mediante digestión química e inspección visual se extrajeron microplásticos del sistema digestivo de 56 individuos. Un total de 90 piezas fueron extraídas del 89% de los peces (93% fibras) con $3,75 \pm 1,70$ (SD) microplástico/pez. Se determinó una cantidad significativamente menor en los crustáceos con un total de 58 piezas extraídas del 76% de los individuos analizados con $2,64 \pm 1,36$ (CF) microplástico/jaiba. Se realiza una búsqueda de microplásticos en tejidos musculares mediante la técnica de histología y se encontraron lesiones en el tejido muscular de los peces, pero los resultados no fueron atribuibles a MP, por ende, no se ahondará en estos datos.

Este artículo reporta la presencia de estos contaminantes en especies marinas de alto nivel trófico en la costa del Pacífico de Costa Rica, lo cual confirma la afectación por plásticos en la zona de estudio, reforzándose la necesidad de una gestión adecuada de los residuos sólidos generados por la población, tanto en la zona terrestre como en la zona marítima.

Keywords

Pelagic; marine biota; carnivorous; chemical digestion.

Abstract

The ingestion of microplastics has been reported in various marine species, however, the degree of contamination in the systems and the biota associated with them is little known. This study presents the results of the presence of microplastics in seven species of pelagic fish and one species of benthic crustacean, all high trophic level from Las Baulas Marine National Park.

By chemical digestion and visual inspection, microplastics were extracted from the digestive system of 56 individuals. A total of 90 pieces were extracted from 89% of the fish (93% fibers) with 3.75 ± 1.70 (SD) microplastic / fish. A significantly lower quantity was obtained in crustaceans with a total of 58 pieces extracted from 76% of the individuals analyzed with 2.64 ± 1.36 (CF) microplastic / crab. A search for microplastics in muscle tissues was carried out using the histology technique and lesions were found in the muscle tissue of the fish, but the results were not attributable to MP, therefore, these data will not be delved into.

This article reports the presence of these pollutants in marine species with a high trophic level on the Pacific coast of Costa Rica, which confirms the impact by plastics in the study area, reinforcing the need for an integral solid waste management system.

Introducción

El plástico es un polímero sintético muy cotizado en la industria debido a su resistencia, versatilidad y bajo costo [1]. Según los registros mundiales, desde el 2014 se producen anualmente más de 300 millones de toneladas de plástico, del cual se estima que un 50% de todo este material termina en el ambiente debido a su mal manejo; y aproximadamente entre 4,8 y 12,7 millones de toneladas métricas acaban en los ecosistemas marinos como microplásticos [2].

Los microplásticos (MPs) se definen como cualquier partícula sólida sintética o de una matriz polimérica, con un rango de tamaño entre 1 μm a 5 mm [3]. Estos consisten en partículas manufacturadas de dimensiones microscópicas consideradas fuentes primarias; como pellets utilizados en la industria y aplicaciones domésticas. Las fuentes secundarias son aquellos que se forman debido a las condiciones climáticas y la fragmentación de plásticos de mayor dimensión [3]–[5]. Los tipos de polímeros más utilizados mencionados previamente tienen alto peso molecular y no son biodegradables. Dentro del ecosistema marino comienzan a sufrir degradación foto-oxidativa por la irradiación solar ultravioleta (UV), seguido de degradación térmica y/o química [6], [7].

A pesar de que existe evidencia de contaminación de microplásticos alrededor del mundo, poco se ha investigado en su impacto en áreas marinas protegidas [8]. Estas zonas han sido establecidas con el fin de reducir la degradación de los hábitats y limitar la explotación de recursos. A pesar de lo anterior, están expuestas a la contaminación plástica existiendo informes de la infiltración de microplásticos en las redes alimentarias de las costas a pesar de encontrarse lejos de las ciudades y de las fuentes de contaminación puntuales [9].

La ingesta de MPs en los organismos marinos representa una preocupación en aumento debido a los riesgos toxicológicos asociados con estas micropartículas [10]. Existen estudios en donde se ha comprobado la ingesta de MPs al identificar diferentes tipos de partículas de polímeros en los intestinos y estómagos de varios organismos, como el zooplancton [11], mariscos [12] (incluyendo mejillones, ostras, almejas y cangrejos), coral [13], peces [14] y mamíferos marinos [15].

Otros estudios han encontrado MPs en órganos no relacionados con el tracto digestivo y que no participan en la digestión, como en las branquias del mejillón *Mytilus edulis* [16] y órganos como el hígado en peces demersales y pelágicos [17]. Además, se ha investigado la adherencia de MPs en tejidos suaves de las almejas, en donde se encontraron adherencias a órganos específicos como al tejido visceral, las quelas y el aductor. Estos contribuían al 50% del MPs en las almejas [18].

En Costa Rica se ha iniciado la investigación sobre microplásticos en años recientes. Se da inicio con estudios en la sardina gallera del Pacífico Central, en donde se determinó que un 100% de los organismos analizados contenían MPs en el sistema digestivo [19]. Se continuó con un monitoreo en arena de playas de las costas pacífica y caribeña de nuestro país, realizados por investigadores del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) [20]. Por último, la Escuela de Biología Marina de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) y el Laboratorio de Estudios Marinos Costeros (LEMACO) han trabajado con prácticas estudiantiles en la búsqueda de una metodología que les permita determinar estas piezas en organismos marinos [21].

El objetivo de esta investigación es contribuir con el conocimiento sobre la presencia de estos materiales, específicamente en especies marinas comerciales cuyas muestras han sido tomadas en una zona dedicada a la conservación, pero que cuenta con influencia antropogénica. En esta investigación se ofrecen datos sobre la presencia de MPs encontrados en los sistemas digestivos de las especies marinas muestreadas. Como es el caso del Parque Nacional Marino las Baulas. En este parque existen diversos tipos de mangle y tiene la particularidad de que la mayoría de los terrenos que lo forman pertenece a empresas privadas [22].

Metodología

Los crustáceos *Callinectes arcuatus* (jaibas) son los organismos bentónicos elegidos para el estudio. Estos se escogieron debido a su abundancia en la zona, su consumo humano y facilidad de captura [23]. En el caso de los peces pelágicos, se capturaron por medio de pesca artesanal ya que permite obtener individuos que habitan en la columna con poca profundidad. Cabe destacar que no se definió una especie en particular debido a que se desconoce las especies predominantes en la zona, por ende, se priorizó la selectividad del método de captura.

Área de Estudio

Este estudio se realizó en el Parque Nacional Marino las Baulas (PNMB), del Área de Conservación Tempisque (ACT), ubicado en la provincia de Guanacaste, cantón de Santa Cruz, en los distritos de Cabo Velas y 27 de abril, a 8 km de la comunidad de Matapalo y a 20 km de Tamarindo vía terrestre y 5 km vía estero. En la figura 1 se muestra la ubicación del PNMB y los sectores en donde se recolectan los crustáceos (Playa Grande, 10°19'28.5"N 85°50'31.6"W) y los peces (Estero de Playa Grande, 10°18'44.0"N 85°50'03.7"W).

La gira de campo se realizó del 27 al 30 de enero del 2020. La recolección de los crustáceos se realizó trazando un transecto de 2 km paralelo con la playa durante los dos periodos de marea baja de cada día, este recorrido se realizó dos veces por cada visita. Para obtener los peces, se efectuaron jornadas de 6 horas de monitoreo a lo largo del Estero de Playa Grande durante los 4 días de la gira.

Al finalizar el periodo de muestreo de cada día, los crustáceos se colocaron en frascos con alcohol al 70%. A los peces se le tomaron las medidas morfológicas de longitud estándar, longitud furcal, longitud total y longitud dorsoventral, además, cada organismo fue enumerado y fotografiado. Se disectó el sistema digestivo (el cual incluye: estómago, intestino hígado, páncreas y ciegos pilóricos) y se colocó en envases con alcohol al 70%. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio de la UNA en estos envases.

En total se lograron capturar 27 peces de 7 especies distintas *Centropomus viridis*, *Lutjanus colorado*, *Centropomus armatus*, *Caranx caninus*, *Centropomus medius*, *Lutjanus novemfasciatus*, *Elops affinis* y 29 crustáceos *Callinectes arcuatus*.

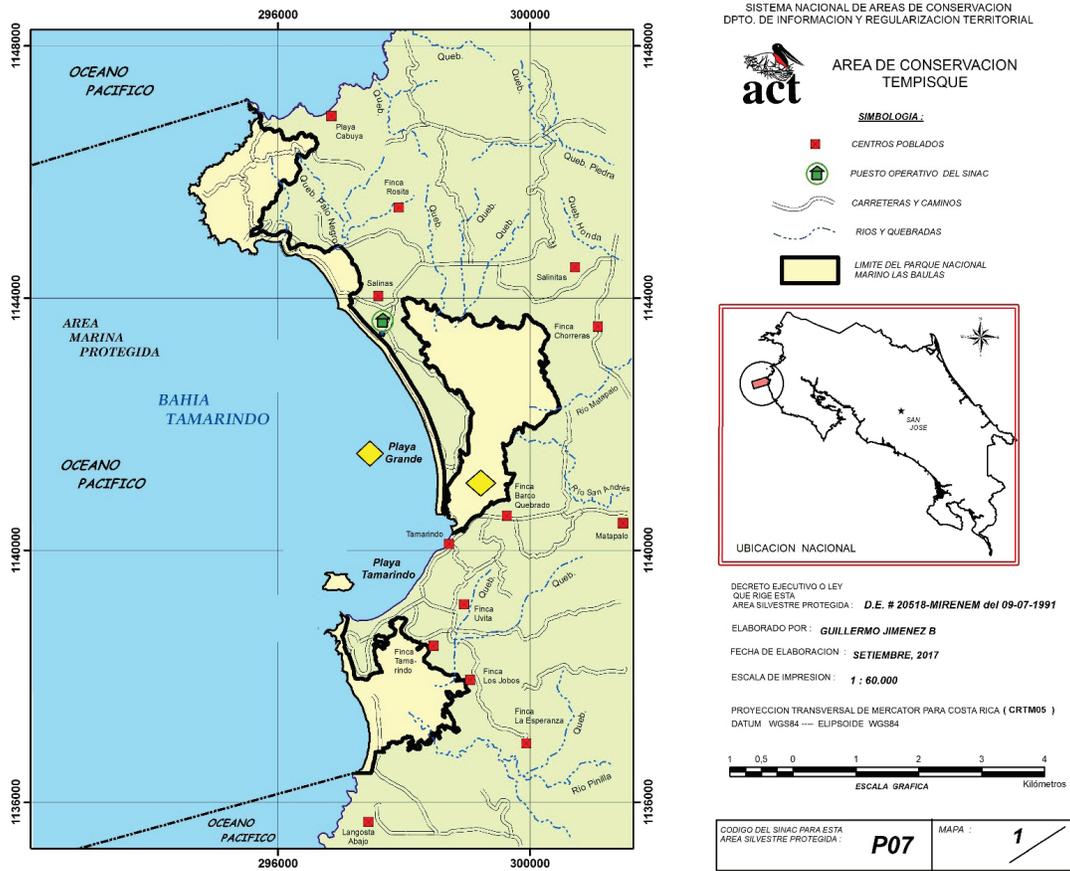


Figura 1. Área de estudio con los límites del área protegida del PNMB. Estrellas amarillas marcan los sectores en donde se recolectan las muestras. Fuente: SINAC, 2021.

Extracción de los microplásticos del sistema digestivo de los peces y cefalotórax de los crustáceos

En la figura 2 se muestran los pasos de la metodología empleada para la extracción de los MPs en el sistema digestivo de los peces y el cefalotórax de las jaibas. Esta se basó en metodologías propuestas en diversas investigaciones en biota marina [6], [24]–[28] incluyendo el uso de ácido acético para el tratamiento de la quitina [29] presente en el residuo post digestión de las muestras. Este consiste en una digestión química con KOH (ac,10%, m/m), durante 24 horas y 60 °C, con una posterior visualización por técnicas ópticas [25]. En los casos en que el resultado post digestión tenía alto contenido de quitina, se realizó un tratamiento con ácido acético (ac,4%, v/v) para convertir parte de la quitina en quitosano y mejorar el proceso de visualización.

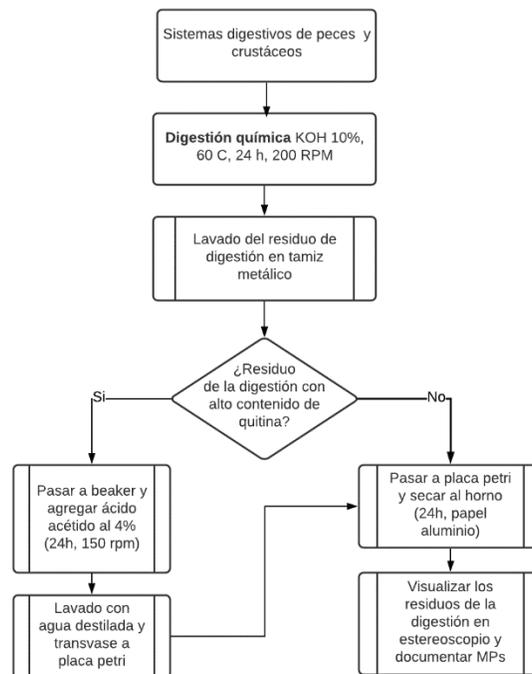


Figura 2. Metodología desarrollada para la determinación de MPs en especies marinas de alto nivel trófico. Fuente propia, basado en [6], [24]–[28].

Identificación física (color tamaño y forma) de los MPs

Para la visualización y búsqueda de MPs al microscopio se tomaron en consideración los lineamientos planteados en el Guía de Identificación de Microplásticos del Marine and Environmental Research Institute [25]. En esta guía se introducen al usuario las características físicas esenciales para describir los MPs, el equipo necesario para su visualización y la manera correcta de leer un filtro o placa Petri. Se hace mención que al identificar MPs se deben pinchar las piezas para determinar su textura ya que la mayoría de los MPs presentan una cierta flexibilidad y no se rompen. Además de que la mayoría de los MPs rebotan o brincan al ser pinchados. Si la pieza se rompe, no debe ser considerada como MP.

Resultados

Estimación de los microplásticos presentes en el sistema digestivo de las especies marinas muestreadas

En el cuadro 1 se muestran los principales resultados obtenidos en los organismos analizados con respecto a la longitud promedio de los individuos, la cantidad de MPs encontrados, la frecuencia de ocurrencia, el total de MPs extraídos y el promedio por individuo.

Se determinó la presencia de MPs en el sistema digestivo de los peces y en el cefalotórax de las jaibas. Un total 148 MPs fueron documentados, 90 en los peces y 58 en las jaibas. En los peces se obtuvo un promedio de 3.75 ± 1.70 (SD) MP/pez, mientras que en estudios realizados en biota marina se reportan datos menores [30]–[32] por ejemplo Vlachogianni *et al.* [33] en el Mar Jordánico reporta un promedio de 1.3 piezas/pez en especies demersales. Por el contrario, solo Abbasi *et al.* y Anastasopoulou *et al.* [17], [34] reportan concentraciones superiores de MPs/individuo a la obtenida en este estudio. Referente a los crustáceos bentónicos costeros

carnívoros (como la jaiba), se determinó un promedio de 2.64 ± 1.36 MPs/jaiba. En crustáceos se han realizado estudios en especies de langostinos y crustáceos decápodos, sin embargo, debido al método de muestreo los resultados se reportaron como MPs/gramos de tejido analizado [35], [36]. Por lo tanto, la información no es comparable debido a los diferentes métodos utilizados.

Cuadro 1. Resultados obtenidos del muestreo de MPs sistemas digestivos de peces y jaibas.

Características	Peces	Jaibas
Cantidad de sistemas digestivos analizados	27	29
Longitud promedio de los individuos analizados	(35.3 \pm 10.5) cm	(50.8 \pm 9.3) mm
Rango de longitud de los individuos analizados	(19.8 - 72.3) cm	(36.6 - 85.7) mm
Cantidad de individuos con al menos 1 MP	24	22
Frecuencia de ocurrencia de MPs	89%	76%
Cantidad de MPs totales extraídos	90	58
MPs promedio por individuo	3.75 \pm 1.70	2.64 \pm 1.36

Para discriminar la ocurrencia de MPs en diferentes especies o áreas geográficas, se estableció utilizar el dato de frecuencia de ocurrencia de MP [24]. Para esta investigación, se encontraron 90 MPs en 24 de los peces muestreados. Por lo tanto, 89% de los peces contiene al menos un MP en el sistema digestivo. En el caso de las jaibas, se determinaron 58 MPs en 22 de los individuos analizados, lo cual representa un 76% de ocurrencia. Los valores reportados en otros lugares del mundo varían desde 0.9% a 76.6% en el sistema digestivo de peces de mayor interés comercial [37]. En el caso de crustáceos se reportan concentraciones desde 13% [45] hasta 67% [47].

De acuerdo con lo mencionado, estos resultados determinan una cantidad significativamente mayor de MPs/ individuo en los peces pelágicos en comparación con los crustáceos bentónicos (Prueba t-Student, $p=0.0004$), no hay una diferencia significativa ($p=0.203$) entre la frecuencia de ocurrencia de MPs entre los peces (organismos pelágicos) y las jaibas (organismos bentónicos). Debido a las diferencias entre especies, zonas muestreadas y métodos de captura, los valores obtenidos no son comparables con los valores reportados en otros estudios.

A pesar de que la zona de muestreo es un área en conservación, es esperado que se encuentren estos contaminantes en la biota. Esto por cuanto se ha demostrado la presencia de los plásticos en zonas inhabitadas, como las regiones polares [38], en las profundidades del océano y montañas prístinas [39].

En el caso específico del PNMB, existen razones puntuales que podrían estar relacionadas con estos resultados. La primera es la actividad antropogénica cercana al parque; ya que como se observa en la figura 1, este se encuentra ubicado cerca de la localidad de Tamarindo. Este distrito es frecuentado por un volumen considerable de turistas y locales, lo cual provoca que el parque sea una zona vulnerable a los problemas asociados a las actividades desarrolladas en sus cercanías; como la gestión de los residuos sólidos, la descarga de aguas residuales y aguas grises, entre otros [40].

En general, los ecosistemas de manglar, debido a la geomorfología y las características de las raíces de sus árboles, pueden estar atrapando y reteniendo más residuos sólidos que otros. Adicionalmente, estos ecosistemas reciben desechos tanto de fuentes terrestres como marinas. Las fuentes terrestres son debidas a actividades antropogénicas, cuyos residuos

son arrastrados por la escorrentía de los ríos que desembocan directamente al manglar. Adicionalmente, las fuentes marinas transportan materiales provenientes del océano, que por corrientes arrastra residuos de otros lugares, y los introduce, con las diferentes mareas, en las estrechas entradas del manglar, quedando atrapados [41], [42].

Analizando la zona de estudio y las posibles fuentes de contaminación, se pudo observar que la entrada de agua dulce del PNMB es aportada por los afluentes de dos quebradas y de los ríos, de poco caudal, Matapalo y Andrés. En las cercanías del PNMB se encuentra el poblado de Tamarindo, conocido por su alta afluencia turística, pero debido a su ubicación, baja altitud y al no estar conectado con otros afluentes, este pueblo no incide directamente en estos cuerpos de agua. Por estas razones, no se considera que el río sea la mayor fuente de contaminación del manglar, sino, el aporte del océano, el cual depende de las corrientes marinas influenciadas por la Contracorriente Ecuatorial del Norte (CCEN) [43].

Según lo mencionado anteriormente se puede considerar que esta zona acumula residuos concentrando contaminantes que pueden afectar el ecosistema. Lo cual reafirma que la contaminación por plásticos afecta a los países, aún a pesar de las fronteras, debido al transporte de larga distancia de residuos en los diferentes sistemas [44].

Identificación física (color, tamaño y forma) de los MPs

En el cuadro 2 se presentan algunas características físicas de todos los MPs encontrados.

Cuadro 2. Características físicas de los MPs encontrados.

Parámetros	Peces	Jaibas
Rango de tamaño de los MPs	(5 254-128) μm	(3 597-101) μm
Promedio del tamaño de los MPs	1188 μm	1130 μm
Colores	Azul (predominante) café, negro, rojo, transparente, blanco	Negro y azul (predominantes), blanco, rojo, transparente
Cantidad de MPs extraídos con forma de fibras	84 (93%)	54 (93%)
Cantidad de MPs extraídos con forma de partículas	6 (7%)	4 (7%)



Figura 4, 5, 6. Variedad de MPs encontrados en los organismos analizados.

En las figuras 4, 5, 6 se muestran algunos de los MPs extraídos del sistema digestivo de los peces y en el cefalotórax de las jaibas. En el cuadro 2, se determina un amplio rango de tamaño de MPs, siendo en promedio aproximadamente 1 mm. Además, el límite inferior determinado es cercano a los 100 μm . El tamaño y el color de las micropartículas son características físicas que usualmente se reportan en los estudios para describir lo encontrado [33], [45], [46]. Esta información puede ser útil en caso de comparar sitios de muestreo, organismos, o incluso, analizar fuentes de contaminación en el laboratorio [25].

De los MPs extraídos en ambos organismos, un 93% son fibras y un 7% partículas. La predominancia de fibras coincide con lo reportado en otros estudios [23]–[28] en donde se atribuye la incidencia de esta forma de MPs con su la facilidad de transporte y distribución en el océano.

Según el hábitat en donde se alimentan los organismos, así puede ser su disponibilidad de ingerir ciertos tipos de MPs [23]. Los organismos pelágicos habitan en aguas libres y no tocan el fondo marino, por ende, su exposición es a los MPs flotantes, como es el caso de las fibras. Los organismos bentónicos habitan en el fondo marino, por lo que están más expuestos a los MPs más densos con capacidad de hundirse y que se encuentran en los sedimentos del fondo marino [24].

Las especies de peces analizadas en este estudio son carnívoros de alto nivel trófico y consumen crustáceos como las jaibas [47], por lo tanto, las posibles fuentes de ingesta de estas microfibras son las piezas distribuidas en la columna de agua y las que contienen los crustáceos. Por el contrario, las fuentes de ingesta de MPs de los crustáceos (como las jaibas) es menor ya que se encuentran en el fondo marino [23].

Conclusiones

Este estudio demuestra que una mala gestión de los residuos sólidos afecta a especies marinas aun en zonas de conservación, se determinó además, la presencia de MPs en el sistema digestivo de las especies analizadas.

Se observa la presencia de estos contaminantes dentro del sistema digestivo del 89% de los individuos de peces y en un 76% de los crustáceos analizados. En total se logran determinar 3.75 ± 1.70 MPs/pez y 2.64 ± 1.36 MPs/crustáceo. En concordancia con estudios previos mencionados anteriormente, predomina la presencia de fibras en los peces y en los crustáceos, ya que representan un 93% de los MPs determinados. Además, el tamaño promedio de MPs es de aproximadamente 1 mm y los colores predominantes son azul y negro.

Recomendaciones

- Costa Rica cuenta con una serie de políticas públicas e instrumentos de gestión y planificación relacionada con la gestión de residuos, pero carece de un Plan Nacional de Residuos Marinos. Por lo anterior, se insta a la formulación de un Plan Nacional de Acción para reducir la contaminación que llega a nuestros mares.
- Continuar con estudios para la determinación de MPs en especies marinas de alto nivel trófico en Costa Rica ya que nos proporcionan información sobre la incidencia de estos contaminantes en hábitats y especies de interés comercial. Esta puede ser utilizada para determinar indicadores ambientales, fuentes de contaminación y desarrollar métodos de gestión para abordar este problema.

Agradecimientos

Gracias a la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional, por la prestación de sus instalaciones y materiales de trabajo, más específicamente al Laboratorio de Biotecnología de Docencia (LABID), Laboratorio de Histología y Laboratorio de Estudios Marino Costeros (LEMACO). A M.Sc. Catalina Viquez Murillo, especialista veterinaria, por su ayuda con la lectura e interpretación de las placas de histología. Gracias a los financiadores para la obtención de muestras: Environmental Science and Resource Management Program de California State University Channel Islands y al Great Basin Institute de Reno, Nevada. También agradecemos al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), específicamente al Área de Conservación Tempisque por el otorgamiento de los permisos de investigación para la extracción de las muestras, bajo los permisos: ACT-OR-DR-021-2019 y ACT-OR-DR-019-2020.

Referencias

- [1] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband, y T. S. Galloway, «Microplastics as contaminants in the marine environment: A review», *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, n.º 12. pp. 2588-2597, dic. 2011, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
- [2] O. S. Ogunola, O. A. Onada, y A. E. Falaye, «Mitigation measures to avert the impacts of plastics and microplastics in the marine environment (a review).», *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 25, n.º 10, pp. 9293-9310, abr. 2018, doi: 10.1007/s11356-018-1499-z.
- [3] N. B. Hartmann *et al.*, «Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, n.º 3, pp. 1039-1047, feb. 2019, doi: 10.1021/acs.est.8b05297.
- [4] J. P. G. L. Frias y R. Nash, «Microplastics: Finding a consensus on the definition», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 138, pp. 145-147, ene. 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.
- [5] R. C. Thompson *et al.*, «Lost at Sea: Where Is All the Plastic?», *Science (80-.)*, vol. 304, n.º 5672, p. 838, may 2004, doi: 10.1126/science.1094559.
- [6] A. L. Andrady, «Microplastics in the marine environment», *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, n.º 8. pp. 1596-1605, ago. 2011, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
- [7] A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed, y S. Ahmed, «Biological degradation of plastics: A comprehensive review», *Biotechnology Advances*, vol. 26, n.º 3. Elsevier, pp. 246-265, may 01, 2008, doi: 10.1016/j.biotechadv.2007.12.005.
- [8] A. M. Saley *et al.*, «Permalink Publication Date Microplastic accumulation and biomagnification in a coastal marine reserve situated in a sparsely populated area», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 146, pp. 54-59, 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.05.065.
- [9] T. Agardy, G. N. di Sciara, y P. Christie, «Mind the gap: Addressing the shortcomings of marine protected areas through large scale marine spatial planning», *Mar. Policy*, vol. 35, n.º 2, pp. 226-232, mar. 2011, doi: 10.1016/j.marpol.2010.10.006.
- [10] Z. Akdogan y B. Guven, «Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs», *Environmental Pollution*, vol. 254. Elsevier Ltd, p. 113011, nov. 01, 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113011.
- [11] X. Sun, Q. Li, M. Zhu, J. Liang, S. Zheng, y Y. Zhao, «Ingestion of microplastics by natural zooplankton groups in the northern South China Sea», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 115, n.º 1-2, pp. 217-224, feb. 2017, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.12.004.
- [12] J. Li *et al.*, «Microplastics in mussels along the coastal waters of China», *Environ. Pollut.*, vol. 214, pp. 177-184, jul. 2016, doi: 10.1016/j.envpol.2016.04.012.
- [13] J. Reichert, J. Schellenberg, P. Schubert, y T. Wilke, «Responses of reef building corals to microplastic exposure», *Environ. Pollut.*, vol. 237, pp. 955-960, jun. 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2017.11.006.
- [14] E. Hermsen, S. M. Mintenig, E. Besseling, y A. A. Koelmans, «Quality Criteria for the Analysis of Microplastic in Biota Samples: A Critical Review», *Environmental Science and Technology*, vol. 52, n.º 18. American Chemical Society, pp. 10230-10240, sep. 18, 2018, doi: 10.1021/acs.est.8b01611.
- [15] M. C. Fossi *et al.*, «Fin whales and microplastics: The Mediterranean Sea and the Sea of Cortez scenarios», *Environ. Pollut.*, vol. 209, pp. 68-78, feb. 2016, doi: 10.1016/j.envpol.2015.11.022.

- [16] M. A. Browne, A. Dissanayake, T. S. Galloway, D. M. Lowe, y R. C. Thompson, «Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.)», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, n.º 13, pp. 5026-5031, jul. 2008, doi: 10.1021/es800249a.
- [17] S. Abbasi, N. Soltani, B. Keshavarzi, F. Moore, A. Turner, y M. Hassanaghahi, «Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf», *Chemosphere*, vol. 205, pp. 80-87, ago. 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.04.076.
- [18] P. Kolandhasamy, L. Su, J. Li, X. Qu, K. Jabeen, y H. Shi, «Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: A novel way to uptake microplastics beyond ingestion», *Sci. Total Environ.*, vol. 610-611, pp. 635-640, ene. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.053.
- [19] S. Rodríguez, «Microplásticos llenan sistema digestivo de sardinas del Pacífico Central tico, revela estudio», *Amelia Rueda*, 2020. <https://www.ameliarueda.com/nota/sardinas-pacifico-central-microplasticos-digestivo-ucr-costa-rica-noticias> (accedido sep. 05, 2021).
- [20] CICA, «Inicia análisis de microplásticos en playas de Costa Rica – Centro de Investigación en Contaminación Ambiental», 2019. <http://cica.ucr.ac.cr/?p=6303> (accedido sep. 05, 2021).
- [21] LEMACO, «LEMACO:Servicios ofrecidos», 2021. <https://www.biologia.una.ac.cr/index.php/servicios-ofrecidos-lemaco> (accedido sep. 05, 2021).
- [22] G. Quesada, «La importancia del Parque Nacional Marino Las Baulas», *Acontecer*, 2010. <https://www.uned.ac.cr/acontecer/opinion/articulos/577-la-importancia-del-parque-nacional-marino-las-baulas> (accedido sep. 05, 2021).
- [23] S. Fischer y M. Wolff, «Fisheries assessment of *Callinectes arcuatus* (Brachyura, Portunidae) in the Gulf of Nicoya, Costa Rica», *Fish. Res.*, vol. 77, n.º 3, pp. 301-311, 2006, doi: 10.1016/j.fishres.2005.11.009.
- [24] F. Bessa, T. Kogel, J. Frias, y A. Lusher, «Harmonized protocol for monitoring microplastics in biota», *Micropoll-Multilevel Assess. microplastics Assoc. Pollut. Balt. Sea View Proj.*, n.º April, pp. 1-30, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.28588.72321/1.
- [25] M. & E. R. Institute, «Guide to Microplastic Identification (Dissecting Microscope)», p. 14, 2012.
- [26] F. M. Baalkhuyur *et al.*, «Microplastic in the gastrointestinal tract of fishes along the Saudi Arabian Red Sea coast», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 131, n.º April, pp. 407-415, 2018, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.04.040.
- [27] P. Agamuthu, «Marine debris, plastics, microplastics and nano-plastics: What next?», *Waste Management and Research*, vol. 36, n.º 10. SAGE Publications Ltd, pp. 869-871, oct. 01, 2018, doi: 10.1177/0734242X18796770.
- [28] A. G. M. Caron, C. R. Thomas, K. L. E. Berry, C. A. Motti, E. Ariel, y J. E. Brodie, «Validation of an optimised protocol for quantification of microplastics in heterogenous samples: A case study using green turtle chyme», *MethodsX*, vol. 5, pp. 812-823, 2018, doi: 10.1016/j.mex.2018.07.009.
- [29] M. Á. Ramírez, A. T. Rodríguez, L. Alfonso, y C. Peniche, «La quitina y sus derivados, biopolímeros con potencialidades de aplicación agrícola», 2010.
- [30] O. Güven, K. Gökdağ, B. Jovanović, y A. E. Kideys, «Microplastic litter composition of the Turkish territorial waters of the Mediterranean Sea, and its occurrence in the gastrointestinal tract of fish», *Environ. Pollut.*, vol. 223, pp. 286-294, 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2017.01.025.
- [31] A. Markic *et al.*, «Double trouble in the South Pacific subtropical gyre: Increased plastic ingestion by fish in the oceanic accumulation zone», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 136, pp. 547-564, nov. 2018, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.09.031.
- [32] C. A. Peters, P. A. Thomas, K. B. Rieper, y S. P. Bratton, «Foraging preferences influence microplastic ingestion by six marine fish species from the Texas Gulf Coast», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 124, n.º 1, pp. 82-88, nov. 2017, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.06.080.
- [33] T. Vlachogianni *et al.*, «Marine litter on the beaches of the Adriatic and Ionian Seas: An assessment of their abundance, composition and sources», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 131, n.º A, pp. 745-756, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.006>.
- [34] A. Anastasopoulou, C. Mytilineou, C. J. Smith, y K. N. Papadopoulou, «Plastic debris ingested by deep-water fish of the Ionian Sea (Eastern Mediterranean)», *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, vol. 74, pp. 11-13, abr. 2013, doi: 10.1016/j.dsr.2012.12.008.
- [35] D. Wójcik-Fudalewska, M. Normant-Saremba, y P. Anastácio, «Occurrence of plastic debris in the stomach of the invasive crab *Eriocheir sinensis*», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 113, n.º 1-2, pp. 306-311, dic. 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.059.
- [36] N. A. C. Welden y P. R. Cowie, «Environment and gut morphology influence microplastic retention in langoustine, *Nephrops norvegicus*», *Environ. Pollut.*, vol. 214, pp. 859-865, jul. 2016, doi: 10.1016/j.envpol.2016.03.067.

- [37] C. Walkinshaw, P. K. Lindeque, R. Thompson, T. Tolhurst, y M. Cole, «Microplastics and seafood: lower trophic organisms at highest risk of contamination», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 190, p. 110066, mar. 2020, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110066.
- [38] A. L. Lusher, V. Tirelli, I. O'Connor, y R. Officer, «Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples», *Sci. Rep.*, vol. 5, oct. 2015, doi: 10.1038/srep14947.
- [39] S. Allen *et al.*, «Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment», *Nat. Geosci.*, vol. 12, n.º 5, pp. 339-344, may 2019, doi: 10.1038/s41561-019-0335-5.
- [40] J. C. Picón Cruz y V. J. Baltodano Zúñiga, «Planificación turística en zonas costeras de Costa Rica. Algunas referencias a Playa Tamarindo (Santa Cruz, Guanacaste)», *InterSedes*, vol. 7, n.º 13, pp. 149-170, 2006.
- [41] C. Calderón, O. Aburto, y E. Ezcurra, «El valor de los manglares», *Biodiversitas*, n.º 82, pp. 1-6, 2009.
- [42] C. Martin *et al.*, «Exponential increase of plastic burial in mangrove sediments as a major plastic sink.», *Sci. Adv.*, vol. 6, n.º 44, 2020, doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5593>.
- [43] E. Proyecto y B. Marino, «CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DEL SECTOR MARINO DEL PARQUE NACIONAL MARINO LAS BAULAS DE GUANACASTE Serie Técnica 15», 2015.
- [44] P. Li, X. Wang, M. Su, X. Zou, L. Duan, y H. Zhang, «Characteristics of Plastic Pollution in the Environment: A Review», *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, 2020, doi: 10.1007/s00128-020-02820-1.
- [45] A. L. Lusher, M. McHugh, y R. C. Thompson, «Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 67, n.º 1-2, pp. 94-99, feb. 2013, doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.11.028.
- [46] J. Bellas, J. Martínez-Armental, A. Martínez-Cámara, V. Besada, y C. Martínez-Gómez, «Ingestion of microplastics by demersal fish from the Spanish Atlantic and Mediterranean coasts», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 109, n.º 1, pp. 55-60, ago. 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.026.
- [47] W. Fischer, F. Krupp, W. Schneider, C. C. Sommer, K. . Carpenter, y V. Niem, «Guía FAO para Identificación de Especies para lo Fines de la Pesca. Pacífico Centro-Oriental», Rome, 1995.

Estimation of the leaf area index from Sentinel images in *Eucalyptus grandis* W.Hill plantations

Estimación del índice de área foliar a partir de imágenes Sentinel en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W.Hill

Rudy Solís-Silvan¹, Facundo Sanchez-Gutiérrez²,
Raúl Enrique Islas-Jesús³, José del Carmen Gerónimo-Torres⁴,
César Orlando Pozo-Santiago⁵, Baltazar Sanchez-Díaz⁶

Fecha de recepción: 10 de marzo de 2021

Fecha de aprobación: 13 de julio de 2021

Solís-Silvan R; Sanchez-Gutiérrez F; Islas-Jesús R.E; Gerónimo-Torres J; Pozo-Santiago C.O; Sanchez-Díaz, B. Estimation of the leaf area index from sentinel images in eucalyptus grandis w.Hill plantations. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 39-47.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5535>



- 1 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, Tabasco, México.
- 2 Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad Maya de Estudios Agropecuarios. México.
- 3 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, Tabasco, México.
- 4 Universidad Autónoma de Chiapas: Facultad Maya de Estudios Agropecuarios. México.
- 5 Universidad Autónoma de Chiapas: Facultad Maya de Estudios Agropecuarios. México.
- 6 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, Tabasco, México.
Corresponding author: baltazar.sanchez@comalcalco.tecnm.mx

Keywords

Biodiversity; pinus plantations; satellite images; potential yield of crops.

Abstract

Eucalyptus grandis plantations are of great importance, from a social point of view due to their great commercial value, and from an ecological point of view because they are capable of harboring a certain biodiversity of species. The leaf area index (LAI) is an important indicator to measure the health of these plantations related to productivity. The objective of this research is to estimate the LAI from Sentinel images in *Eucalyptus grandis* plantations. Sentinel satellite images were used to estimate the LAI in the plantations, later the statistical analyzes were carried out by means of a comparison of independent means. Values were obtained as the mean that was 2.0 of the leaf area index in the plantations, these results were very similar to those obtained in other investigations carried out in the field. Therefore, it is recommended to use this methodology in other types of plantations, since it can be used to be applied in other equations to calculate the potential yield of crops.

Palabras clave

Biodiversidad; plantaciones de pino; imágenes de satélite; rendimiento potencial de cultivos.

Resumen

Las plantaciones de *Eucalyptus grandis* son de gran importancia, desde el punto de vista social por su gran valor comercial, y desde el punto de vista ecológico porque son capaces de albergar cierta biodiversidad de especies. El índice de área foliar (IAF) es un indicador importante para medir la salud de estas plantaciones relacionado con la productividad. El objetivo de la presente investigación es estimar el IAF a partir de las imágenes Sentinel en plantaciones de *Eucalyptus grandis*. Se utilizaron imágenes de satélite Sentinel para estimar el IAF en las plantaciones, posteriormente se realizaron los análisis estadísticos mediante una comparación de medias independientes. Se obtuvieron valores como la media que fue de 2.0 del índice de área foliar en las plantaciones, estos resultados fueron muy similares a los obtenidos en otras investigaciones realizadas en campo. Por lo que, se recomienda usar esta metodología en otro tipo de plantaciones, ya que puede servir para aplicarse en otras ecuaciones para calcular el rendimiento potencial de cultivos.

Introduction

At the global level, *Eucalyptus grandis* plantations for commercial purposes are an alternative for economic, social and ecological production, since it has a high demand as a forest raw material [1]. The tropical regions of Mexico are considered with great potential for the establishment of fast growing commercial forest plantations (PFC), one of them is the genus *Eucalyptus grandis* with a growth rate, therefore, they are an alternative for reforestation in the southeast of Mexico [2]. *Eucalyptus grandis* plantations are not only important because of their high economic value, but also because they are home to a great biodiversity of wildlife, such as *Alouatta pigra* in southeastern Mexico [3], *Scolopendra cingulata* in northern Spain [4], birds, insects (*Nephila pilipes*); *Sylvilagus brasiliensis*, *Mazama temama*, *Puma concolor*, *Canis lupus*, *Oryzomys nigripes*, *Monodelphis americana* and *Marmosa murina* in southeastern Brazil [5] [6]. These plantations are capable of storing a large amount of CO₂, both in the vegetation and in the soil, they are relevant in the exchange of CO₂ between the biosphere and the atmosphere; Therefore,

they are considered capable of reducing the concentration of Greenhouse Gases (GHG), as well as great potential to increase CO₂ uptake [7]. For this reason, it is important to measure certain parameters related to growth, productivity and nutrient cycle in these plantations [8]. It is estimated that in southeastern Mexico the reforestation of grasslands with high-productivity *Eucalyptus grandis* generates a net catch of between 320 and 610 ton/ha in a period of seven years. If it is captured in a reforestation project of 21,000 ha, it is equivalent to 6 to 11% of the annual net emissions of, caused by deforestation in the southeast of Mexico, which is equivalent to 67 million tons per year, which concludes that the project after two years will show significant levels in biomass production and carbon sequestration [9]. In addition, these plantations fulfill the function of regulating the hydrological cycle, through water favoring its infiltration and the maintenance of a higher relative humidity than in the uncovered lands [10]. Therefore, the *Eucalyptus grandis* is an ideal species to repopulate deforested and degraded lands or to be incorporated into agricultural lands [5].

The leaf area index (LAI) is an important biophysical indicator of forest health that is linearly related to productivity, and serves as a key criterion for potential nutrient management [11]. LAI is widely used in silvicultural decision support, used to monitor, model and manage plantations [12]. Modern forestry requires estimating the LAI derived from satellite images. Therefore, there is great potential and an existing need for LAI estimates from medium resolution sensors for use in forest management. There are methodologies that apply equations and where it is important to have data available such as the LAI, for example, to estimate the potential yield of crops, where the method of Agro-ecological Zones (ZAE) proposed by FAO is used [13], and which requires having LAI data. The LAI is a useful variable to characterize the dynamics and productivity of forest ecosystems [14], it provides us with information about the photosynthetic quantity present in relation to the total surface of the ecosystem or study area [15]. The direct or field methodologies that are normally used are carried out through the collection of individual plants and the development of complex allometric equations [16], as is the case of the measurement of the LAI in crops of corn in Acayucan, Veracruz, the work was carried out for three years with weekly measurements [17]. There are studies where the LAI has been calculated in *Eucalyptus grandis* plantations through procedures applied in the field, obtaining values with an average (M) of LAI 3.3 in *Eucalyptus grandis* plantations in Colombia [18], In Costa Rica, they obtained LAI data of 2.5 by indirect method with FDH-app [39]. Because of this, there is a need to obtain reliable and accessible data, which is why satellite images such as Sentinel 2 have recently been used to obtain this type of information [11].

Satellite imagery gives forest scientists and managers the ability to obtain accurate and timely LAI estimates [12]. Technological advances in geospatial analysis and the launching of satellites capable of retrieving data at more precise resolutions with better focused wavelength spectra and shorter return intervals have provided the opportunity to improve LAI mapping and monitoring at forest sites [11]. Operated by the European Space Agency (ESA), Sentinel-2 specifically refers to two satellites, Sentinel-2A and Sentinel-2B, which have been operationally in orbit since the launch of Sentinel-2B in early 2017. In passive remote sensing, The LAI is commonly calculated based on a spectral vegetation index (SVI), which is a combination of multiple spectral bands to calculate a single value. Therefore, the objective of this research is to estimate the LAI from Sentinel 2 images in *Eucalyptus grandis* plantations.

Materials and methods

Study site

The research was carried out at Finca El Pital. Located in the municipality of Cajibío, Cauca, Colombia (table 1; figure 1).

Table 1. Study site data.

Study site	Location	Coordinates (UTM)		Source
		X	Y	
Finca El Pital	Cajibío	323508	286968	[18]

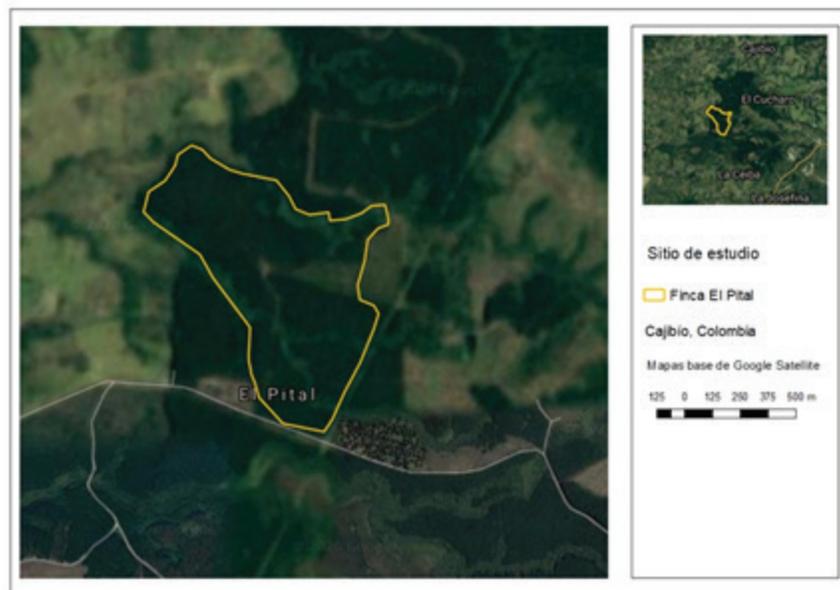


Figure 1. Study site.

Acquisition and pre-processing of satellite images

Sentinel satellite images were used, which were obtained from the portal: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. With acquisition date of February 11, 2020. Radiometric and atmospheric corrections were made with the QGIS software using the Semi-Automatic Classification plugin.

Model to calculate the Leaf Area Index and sampling

To estimate the Leaf Area Index in *Eucalyptus grandis* plantations, the model obtained by [11].
 $LAI = 0.310SR - 0.098$

Where SR is the simple ratio of the near infrared (NIR) and red bands (Band 8 and Band 4, respectively) calculated using Sentinel-2 Level-2A surface reflectance images.

The sampling units will be obtained from the study site for their respective statistical analysis.

Data analysis for independent means comparison

Parametric statistical tests were carried out to establish significant differences between the values of each index in the *Eucalyptus grandis* plantations. Student's t test was applied for two independent samples, with SAS software.

In this case, two hypotheses were raised:

- H0: There is no significant difference between the vegetation index values for each *Eucalyptus grandis* plantation, so all groups are equal and do not differ from each other.
- H1: There are significant differences between the vegetation index values for each *Eucalyptus grandis* plantation.

The significance level is 5%, that is, for any probability value (p-value) less than or equal to 0.05 it means statistically significant differences. However, if it is greater than 0.05, they are statistically the same.

Results

Estimation of the Leaf Area Index and Sampling

The leaf area index was estimated in *Eucalyptus grandis* plantations by processing Sentinel 2A satellite images. The study site was divided into 2 sampling units, where in each of them 10 samples were obtained to perform the comparison of means (figure 2).

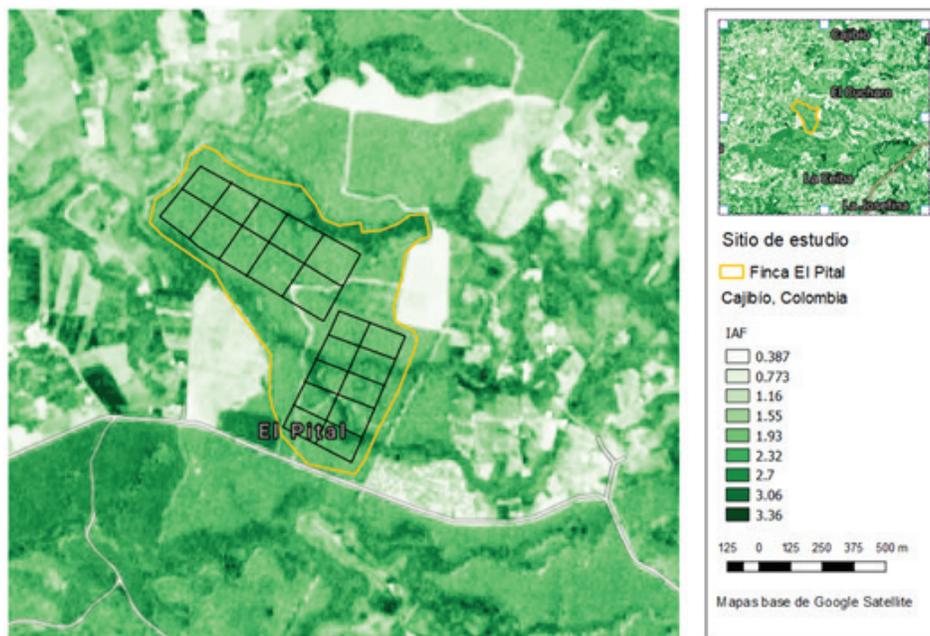


Figure 2. Leaf area index and sampling areas in *Eucalyptus grandis* plantations.

Statistical analysis of the values obtained from the leaf area index

The value of t was -1.76, obtained from the comparison of means of the leaf area index in the two sampling units, and taking with reference the values of $TT = \pm 2.2622$, they show that there is no statistically significant difference, so that statistically the values of the leaf area index are equal, a mean of 2.0 was obtained (figure 3).

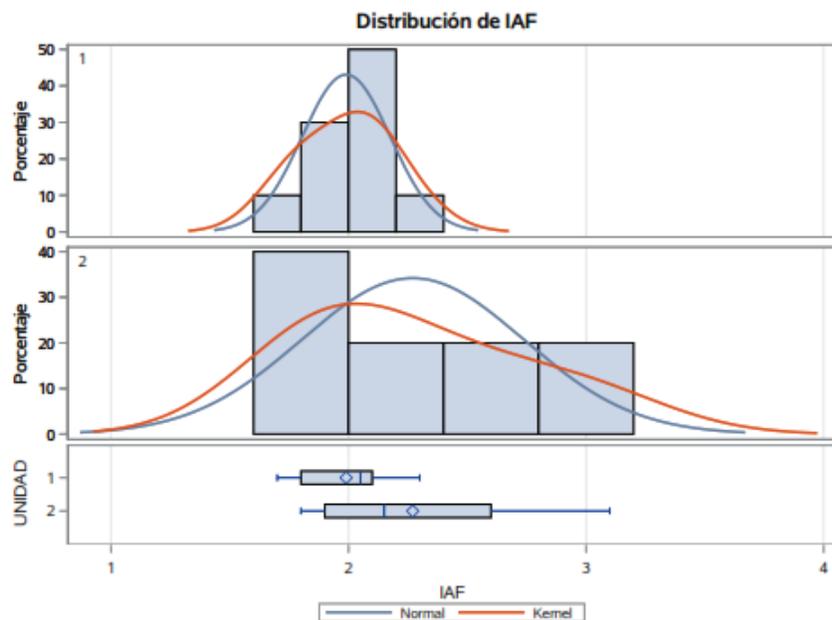


Figure 3. Diagram of the comparison of means of the two sampling units

Discussion

Anthropogenic activities have deforested forests, establishing *Eucalyptus grandis* plantations due to their economic value and high growth rate [19]. Forests are the main regulators of carbon, energy and water cycles, as they provide the basis for carbon storage, cooling of the earth's surface and the distribution of water resources [20], as well as biodiversity, so there is no other ecosystem that can replace the functions. However, *Eucalyptus grandis* plantations have the potential to preserve certain species that are adapted to these plantations, as well as capture carbon by having an active role in the exchange of CO₂ between the biosphere and atmosphere [7]. But they also generate negative environmental impacts from the preparation of the soil, cleaning with a tractor that can pulverize the soil and when it is carried out with herbicides it causes contamination to the aquifers and water bodies. In addition, herbicides negatively affect native or exotic species of flora and fauna [21]. In *Eucalyptus grandis* plantations, the use of fire as a tool for cleaning the land and controlling undesirable weeds is common, as well as to facilitate exploitation tasks [22]. With burning, the soil becomes acidic, organic matter, humus, exchangeable bases are lost and the nutrient content is modified [23] [24]. Therefore, the rotational management of plantations with fire has negative effects on soil quality and can be grouped into: abiotic environment (reduction of the amount of water available in the subsoil and loss of soil nutrients) and biotic (inhibition of growth of native vegetation and reduction of local fauna) [21]. *Eucalyptus grandis* and *Pinus radiata* are plantations with productive purposes, together they represent 70% of the planted area worldwide due to the similar characteristics that they share make them economically very interesting [25]. Among them, rapid growth, high productivity, and adaptability to a diversity of environments [26]. *Eucalyptus grandis* plantations have been compared to pine plantations, since both species have significant economic value due to the fact that they are used for various types of human activities [27]. The use of pines implies the extraction of wood, production of charcoal and firewood, paper production and various personal handling utensils derived from wood [28], instead the use of *Eucalyptus grandis* apart from covering the timber productions its nectar is a source of excellent quality honey. The leaves contain 0.12-0.26% essential oil; the main components are d-alpha-pinene,

esters and alcohols [29]. In general, the *Eucalyptus grandis* have cups that constitute a rough aerodynamic surface, often with a relatively large leaf surface, which facilitates the exchange of heat and water vapor with the atmosphere. Furthermore, it confers high stomatal resistance, which confers low perspiration [31]. The *Eucalyptus grandis* grandis as they belong to the tropics and can favor the native flora and fauna of the place, while the pines are from temperate zones where you can find greater abundance and richness of small mammal species, such as, for example: *Ochrotomys nuttalli*, *Blarina carolinensis*, *Peromyscus* Spp, which have the highest occupation within the plantations with 88% in habitat [30].

Research has been done on Pine plantations, such as calculating the LAI through satellite imagery in Sentinel 2 [11], it has also been shown to be an important predictor of site nutrient status in pine and can be used to determine the probability of response from forest management [32]. Sentinel provides the ability to obtain accurate and timely LAI estimates, thus there is also a strong potential and the existing need for LAI estimates from medium resolution sensors for use in management [11]. Due to the relevance of this type of research, the present research carried out the estimation of the LAI in *Eucalyptus grandis* plantations since this plantation has sufficient similarities to pine plantations in terms of its rapid growth and high productivity, but also being the plantations that generate better wood for the industry. There are other indices that could be calculated through satellite images such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) or Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), among others; However, in this research, the Foliar Area Index (LAI) was chosen because it is a metric that currently requires many investigations to calculate this parameter and help to zoning or calculate the potential yield of certain crops [13]. Similarly, the LAI provides information about the amount of photosynthetic surface that exists in relation to the total surface of the ecosystem and is related to vital processes such as photosynthesis, respiration, and productivity, therefore, it is important to have spatial information. LAI at landscape scale [15] [33]. The most widely used indirect method for estimating the LAI is based on satellite images and consists of associating it with spectral characteristics and vegetation indices. Consequently, accurate maps with the spatial distribution of the LAI are necessary for a better understanding of the structure and function of forests and to quantify different biophysical and / or biological variables in them [15]. Over the years it has been shown that the use of satellite images for monitoring and estimating the LAI of tree species is a viable option, because notable setbacks are avoided such as travel to the sampling site, exposure to the climate per season in the area, the use of expensive and delicate devices, among others [11] [17] [14].

Satellite images with high spatial resolution potentially provide more texture information than medium resolution data because they allow the finest structure of the forest to be distinguished, for example vegetation structure, canopy structure, tree height and the spacing between them. This fine structure is manifested in images with high spatial resolution as variations in the tonality of the image [34]. The texture information extracted from satellite images has been shown to improve the precision of LAI estimates [35] [34], given that the information on the texture of pixels and the high spatial resolution of the image are associated with the structural attributes of the forest [36]. However, remote sensors that have high spatial resolution to estimate the LAI at a local scale lack the temporal resolution to map the evolution of the vegetation in different stations. Texture information extracted from high-resolution images together with spectral information from the image better characterizes the LAI. The results of the study is that the LAI varies not only to the phenology of the forest, but also due to the relationship between field measurements and estimates based on satellite images that change between stations, generating models with different explanatory variables [15]. In the present study, through satellite images, the leaf area index was obtained remotely with an average of 2.0, this data is similar to those obtained in field investigations where average values of 2.1 have been obtained [18], and using a pair of LAI-2000 equipment, resulting in the LAI an average of 2.86 [37], and 2.75 [38].

Conclusions

When comparing studies carried out in the field, in this research good estimates of the LAI were obtained in *Eucalyptus grandis* plantations through the use of satellite images such as Sentinel, so it is recommended to use this methodology in other forest plantations such as *Pinus radiata*, as that these plantations are very similar to those of *Eucalyptus grandis*. Reliable data were obtained from the LAI to be applied in other methodologies used to estimate the potential yield of certain crops, so it is also recommended to calculate other indices such as the NDVI or SAVI in these plantations that could be used to measure the health of the plantations. These tools serve as silvicultural decision support, used to monitor, model, and manage plantations.

References

- [1] Hernández-Ramos, J., Santos-Posadas, H. M., Valdéz-Lazalde, J. R., Tamarit-Urias, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A. & Peduzzi, A. (2017). Estimación del volumen comercial en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* con modelos de volumen total y de razón. *Agrociencia*, 51(5), 561-580.
- [2] Palma-Lopez, D., Salgado-Garcia, S., Martinez Sebastian, G., Zavala-Cruz, J., & Lagunes-Espinoza, L. D. C. (2015). Changes in Soils Properties of Eucalyptus Plantations in Tabasco, Mexico. *ECOSISTEMAS Y RECURSOS AGROPECUARIOS*, 2(5), 163-172.
- [3] Bonilla Sánchez, N. Serio-Silva, JC; Pozo -Montuy, G & Chapman, C. (2012). Los aulladores pueden sobrevivir en plantaciones de eucalipto donde hay vegetación remanente y en regeneración. *Revista Internacional de Primatología*. 233-245.
- [4] Cabanillas, D. (2019). Centipede biodiversity (Myriapoda, Chilopoda) in two eucalyptus plantations in northern Spain and other records from Vegadeo (Asturias, Spain).
- [5] Poore, M. E. D., & Fries, C. (1987). Efectos ecológicos de los eucaliptos.
- [6] Timo, TP, Lyra-Jorge, MC, Gheler-Costa, C. y Verdade, LM (2015). Efecto de la edad de la plantación sobre el uso de rodales de eucalipto por mamíferos silvestres de tamaño mediano a grande en el sureste de Brasil. *iForest-Biogeosciences and Forestry* , 8 (2), 108.
- [7] Ruiz, E. P., & Vichot, M. B. (2014). La retención de carbono en plantaciones forestales.: Estudio de caso: Empresa Forestal Integral "Cienfuegos". *Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFORES*, 2(2), 9.
- [8] Goya, J. F., Frangi, J. L., & Dalla Tea, F. (1997). Relación entre biomasa aérea, área foliar y tipos de suelos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 102.
- [9] Seppanen, P. (2002). Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Foresta veracruzana*, 4(2), 51-58.
- [10] Hofstede, R. (1998). Impactos ecológicos de plantaciones forestales. In II Conferencia Electrónica sobre Usos Sostenibles y Conservación del Ecosistema Páramo en los Andes (p. 82).
- [11] Cohrs, C. W., Cook, R. L., Gray, J. M., & Albaugh, T. J. (2020). Sentinel-2 Leaf Area Index Estimation for Pine Plantations in the Southeastern United States. *Remote Sensing*, 12(9), 1406.
- [12] Blinn, C. E., House, M. N., Wynne, R. H., Thomas, V. A., Fox, T. R., & Sumnall, M. (2019). Landsat 8 based leaf area index estimation in loblolly pine plantations. *Forests*, 10(3), 222.
- [13] Rivera-Hernández, B., Aceves-Navarro, L. A., Juárez-López, J., Palma-López, D. J., González-Mancillas, R., & González-Jiménez, V. (2012). Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México. *Avances en investigación agropecuaria*, 16(1), 29-47.
- [14] Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., de los Santos-Posadas, H. M., Haapanen, R., & Aguirre-Salado, A. I. (2009). Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino patula en Hidalgo, México. *Agrociencia*, 43(2), 209-220.
- [15] Nafarrate-Hecht, A. C., Dupuy-Rada, J. M., George-Chacon, S. P., & Hernández-Stefanoni, J. L. (2018). Modelización y mapeo estacional del índice de área foliar en un bosque tropical seco usando imágenes de satélite de alta resolución. *Madera y bosques*, 24(3).
- [16] Gower, S. T., Kucharik, C. J., & Norman, J. M. (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote sensing of environment*, 70(1), 29-51.

- [17] Tinoco-Alfaro A. (2006). Modelación del índice de área foliar y su relación con el rendimiento, en función del arreglo espacial de plantas en el cultivo de maíz.
- [18] Papamija-Muñoz, D., & García-Solórzano, C. (2012). Estimación del índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Colombia forestal*, 15(2), 261-271.
- [19] Martínez-Ruiz, R., Azpíroz-Rivero, H. S., Cetina-Alcalá, V. M., & Gutiérrez-Espinoza, M. A. (2006). Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. *Ra Ximhai*, 2(3), 815-846.
- [20] Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyoso, D. & Gaveau, D. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51-61.
- [21] Ceccon, E., & Martínez-Ramos, M. (1999). Aspectos ambientales referentes al establecimiento de plantaciones de eucalipto de gran escala en áreas tropicales: aplicación al caso de México. *Interciencia*, 24(6), 352-359.
- [22] Rodríguez TDA (1988): Efecto de los incendios en los ecosistemas forestales. COCODER. México.
- [23] Sánchez PA (1979): Soil fertility and conservation considerations for agroforestry systems in the humid tropics on Latin America. En: *Soils Research in Agroforestry*. HO Mongi y Huxley (eds.) 79-124.
- [24] Darrow W (1993): The sustainable silviculture of commercial eucalyptus plantations in South Africa". En: *Los Eucaliptos en el Desarrollo Forestal de Chile*. Pucon, Chile.
- [25] Indufor. Strategic Review on the Future of Forest Plantations in the World.2012. Disponible en línea: <http://www.fao.org/forestry/42701-090e8a9fd4969cb334b2ae7957d7b1505.pdf>
- [26] Dodet, M., & Collet, C. (2012). When should exotic forest plantation tree species be considered as an invasive threat and how should we treat them?. *Biological Invasions*, 14(9), 1765-1778.
- [27] Clapp, R. A. (2001). Tree farming and forest conservation in Chile: do replacement forests leave any originals behind?. *Society & Natural Resources*, 14(4), 341-356.
- [28] Ospina-Penagos, C. M., Hernández-Restrepo, R. J., Rincón, E. A., Sánchez-Ocampo, F. A., Urrego-Mesa, J. B., Rodas-Peláez, C. A. & Riaño-Herrera, N. M. (2011). El Pino pátula. Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana.
- [29] Ospina Penagos, C. M., & Rodas, C. A. (2006). Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana. El eucalipto.
- [30] Miller, D. A., Thill, R. E., Melchiors, M. A., Wigley, T. B., & Tappe, P. A. (2004). Small mammal communities of streamside management zones in intensively managed pine forests of Arkansas. *Forest Ecology and Management*, 203(1-3), 381-393.
- [31] Jarvis, P. G., & Stewart, J. B. (1979). Evaporation of water from plantation forest.
- [32] Fox, T. R., Lee Allen, H., Albaugh, T. J., Rubilar, R., & Carlson, C. A. (2007). Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. *Southern Journal of Applied Forestry*, 31(1), 5-11.
- [33] Hecht, A. C. N. (2017). Estimación directa e indirecta del índice de área foliar (IAF) y su modelación con LiDAR en un bosque tropical seco de Yucatán (Doctoral dissertation, Centro de Investigación Científica de Yucatán).
- [34] Zhou, J. J., Zhao, Z., Zhao, J., Zhao, Q., Wang, F., & Wang, H. (2014). A comparison of three methods for estimating the LAI of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) plantations on the Loess Plateau, China. *International Journal of Remote Sensing*, 35(1), 171-188.
- [35] Gray, J., & Song, C. (2012). Mapping leaf area index using spatial, spectral, and temporal information from multiple sensors. *Remote Sensing of Environment*, 119, 173-183.
- [36] Kalacska, M., Sanchez-Azofeifa, G. A., Rivard, B., Caelli, T., White, H. P., & Calvo-Alvarado, J. C. (2007). Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary tropical dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 108(1), 82-96.
- [37] Xavier, Alexandre Cândido, Soares, Joao Viane, & Almeida, Auro Campi de. (2002). Variación del índice de área hoja en clones de eucalipto a lo largo de su ciclo de crecimiento. *Revista árre*, 26(4), 421-427.
- [38] Kallarackal, J., & Somen, C. K. (1997). Water use by *Eucalyptus tereticornis* stands of differing density in southern India. *Tree Physiology*, 17(3), 195-203.
- [39] Valverde, J. C., & Arias, D. (2020). Evaluación del índice de área foliar con método indirecto y directo en distintas condiciones ambientales en plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus tereticornis* Sm. *Madera y bosques*, 26(2).

Remoción de materia orgánica natural por tratamiento convencional de agua en un río tropical

Natural organic matter removal by conventional water treatment in a tropical river

Joaquín Jiménez-Antillón¹, Sidney Quesada-Delgado²,
Luis G. Romero-Esquivel³

Fecha de recepción: 14 de febrero de 2021

Fecha de aprobación: 23 de junio de 2021

Jiménez-Antillón, J; Quesada-Delgado, S; Romero-Esquivel, L.G. Remoción de materia orgánica natural por tratamiento convencional de agua en un río tropical. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 48-60.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5547>

- 1 Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: joajimenez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8532-8985>
- 2 Programa de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: sidmqd91@gmail.com
- 3 Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: lromero@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7191-3195>



Palabras clave

Potabilización; tratamiento convencional; coagulación/floculación; materia orgánica natural (MON); subproductos de desinfección (SPD); trihalometanos (THM).

Resumen

En Costa Rica, la efectividad del tratamiento convencional de agua es evaluada principalmente en términos de remoción de color y turbidez y no de materia orgánica natural (MON) que, al clorarla, puede formar subproductos de desinfección (DBPs) potencialmente carcinogénicos como los trihalometanos (THMs). Se monitoreó mensualmente, de marzo 2015 a febrero 2016, en cada etapa del tratamiento, el agua de la planta potabilizadora del río Jorco, en San José. Se cuantificaron carbono orgánico total (COT) y disuelto (COD), absorbancia ultravioleta a 254nm (UV_{254}) y absorbancia ultravioleta específica (SUVA). Durante todo el período, el COT y DOC del agua cruda variaron entre $0,42 \pm 0,01$ mg-C/L y $0,96 \pm 0,19$ mg-C/L. La absorbancia UV_{254} y el SUVA variaron entre $0,0106$ cm⁻¹ y $2,71 \pm 0,55$ L/mg-m (época seca) y $0,250$ cm⁻¹ y $2,06 \pm 1,16$ L/mg-m (época lluviosa), indicando mezcla de sustancias aromáticas y alifáticas. La mayor eficiencia de remoción durante las dos estaciones, fue en el proceso de coagulación-sedimentación con valores cercanos a 21% y 23% para COT y COD, respectivamente. El sistema total removió el 51% de UV_{254} y 32% SUVA, indicando remoción de MON aromática, precursora de DBPs. La determinación de UV_{254} mostró buena correlación con MON (>99% según coeficiente de Pearson), indicando su posible uso como sustituto al análisis de COT y COD. Considerando el tipo y la baja concentración de MON del agua cruda junto con la capacidad del tratamiento, el monitoreo de THMs en la red de distribución confirmó una producción de THMs totales cercana a 10 µg/L, muy por debajo a la legislación nacional (460 µg L⁻¹ como trihalometanos totales).

Keywords

Potabilization; conventional treatment; coagulation/flocculation; disinfection by products; natural organic matter (NOM); trihalomethanes.

Abstract

In Costa Rica, the effectiveness of the water purification process by conventional method is evaluated primarily in terms of color and turbidity removal and not of natural organic matter (NOM), which, when chlorinated, can form potentially carcinogenic disinfection by-products (DBPs) such as trihalomethanes (THMs). Water from the Jorco river treatment plant, in San José, was monitored, monthly, from March 2015 to February 2016, at each stage of the treatment. Total (TOC) and dissolved (DOC) organic carbon, ultraviolet absorption at 254 nm (UV_{254}) and the specific UV absorbance (SUVA) were quantified. During the whole period, TOC and DOC from crude water ranged between $0,42 \pm 0,01$ mg-C/L to $0,96 \pm 0,19$ mg-C/L. UV_{254} absorbance and SUVA ranged from $0,0106$ cm⁻¹ and $2,71 \pm 0,55$ L/mg-m (dry season) to $0,250$ cm⁻¹ and $2,06 \pm 1,16$ L/mg-m (rainy season), indicating a mixture of aromatic and aliphatic substances in water. In the treatment system, the coagulation-settling stage had the greatest removal efficiency with close to 21% and 23% for TOC and DOC, respectively, during both seasons. The total purification system removed 51% of UV_{254} and 32% of SUVA, showing the removal of aromatic NOM, a precursor of DBPs. UV_{254} quantification showed a good correlation with NOM (>99% in accordance with Pearson's correlation coefficient), indicating its possible use as a substitute for TOC and DOC analysis. Considering the type and low concentration of NOM in raw water together

with the efficiency of the treatment, THMs monitoring in the distribution system, confirmed a total trihalomethane (TTHMs) production close to 10 µg/L, well below the national regulations (460 µg L⁻¹ as total trihalomethanes).

Introducción

El proceso de potabilización para el agua de consumo humano emplea métodos de desinfección utilizando, principalmente, cloro como agente desinfectante, debido a su capacidad para inactivar organismos patógenos y a su poder desinfectante residual. Sin embargo, el cloro también reacciona con la materia orgánica natural (MON) presente en el agua generando subproductos de desinfección (DBPs, por sus siglas en inglés) como los trihalometanos (THMs). Los THMs han sido asociados con daños al hígado, riñones y sistema nervioso central, además son considerados probables y posibles carcinógenos humanos [1] [2].

Las estrategias recomendadas para reducir la formación de DBPs consisten en el uso de un desinfectante diferente al cloro, la eliminación de DBPs después de formados o la remoción de MON antes de la desinfección. La primera alternativa presenta la desventaja que otros desinfectantes también pueden formar DBPs, por ejemplo, se ha reportado la formación de hasta 14 compuestos carbonílicos después de la ozonización [3]. La remoción de DBPs al final del tratamiento, generalmente usando carbón activado, es costosa. Por último, la reducción de la MON precursora de DBPs en el agua cruda ha demostrado ser efectiva para la producción de agua con bajas concentraciones de DBPs [4].

La presencia de MON se monitorea a través de parámetros indicadores como el carbono orgánico total, carbono orgánico disuelto, absorbancia de luz ultravioleta a 254nm (UV_{254}) y absorbancia de luz ultravioleta específica (SUVA en inglés) ($SUVA = UV_{254} / COD * 100$). Según Matilainen *et al.* [4] el tratamiento convencional utilizando coagulación/floculación con $Al_2(SO_4)_3$ ha demostrado ser efectivo en la remoción del 25-67% y el 44-77% de COD y UV_{254} , respectivamente. En países en desarrollo y de región tropical existen pocos estudios que evalúen la remoción de la materia orgánica en las plantas potabilizadoras [5], [6] y [7]. Probablemente, lo anterior responde a que en la mayoría de los países en desarrollo, el proceso de potabilización busca eliminar el color y la turbidez, pero rara vez las pautas regulatorias se enfocan en monitorear la presencia de DBPs y de parámetros indicadores de la presencia de MON como el COD [1].

Según Mora-Alvarado y Portuguesez-Barquero [8], en Costa Rica, en el año 2016, se estimó que un 91,8% de la población recibía agua de calidad potable y el 88,8% de dicha población recibía agua potable después de someterse a tratamiento y/o desinfección. Según el mismo estudio, el agua provenía de 5222 diferentes fuentes de abastecimiento: 1217 pozos, 3644 nacientes y 361 de agua superficial. En general, los dos primeros tipos presentan buena calidad y, por tanto, la cloración es el único tratamiento necesario. Por el contrario, las fuentes superficiales, correspondiendo a un 6,9% del total [8], dada su naturaleza, podrían presentar concentraciones considerables de MON proveniente de los alrededores (MON alóctona) y generada en la propia columna de agua (MON autóctona). Sin embargo, los datos sobre la formación de DBPs en esas fuentes son escasos, Por lo anterior, surge la necesidad de generar datos del contenido de MON en dichas fuentes superficiales y, sobre todo, en las que requieren de un tratamiento convencional para obtener agua con los parámetros de turbidez y color apropiados. En este tipo de fuentes, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (A y A) opera 34 plantas y existen tres plantas operadas por una Asociación Administradora de Sistemas de Acueducto y Alcantarillado Comunal [9].

El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de remoción de MON en el agua que trata la planta potabilizadora convencional el Cedral ubicada en el río Jorco en San José, como un caso de estudio de un río tropical y de Costa Rica. Se cuantificaron concentraciones de

materia orgánica natural en época seca y lluviosa; y se calculó la eficiencia de remoción en cada etapa involucrada en el proceso y en todo el sistema. Además, se caracterizó el tipo de MON involucrada y se encontró un parámetro sustituto a los análisis de COD que facilitaran a los operarios del acueducto realizar el monitoreo de esta. Finalmente, se evaluó la presencia de trihalometanos en la red de distribución para confirmar la eficiencia del sistema de tratamiento contra la formación de DBPs.

Materiales y métodos

Lugar de estudio

La investigación se realizó en la planta potabilizadora (PP) de tipo convencional El Cedral del Río Jorco que abastece al Distrito de San Ignacio, Acosta, San José, Costa Rica (figura 1). La planta se localiza a una Latitud: $9^{\circ}48'34.84''$ N y una Longitud: $84^{\circ}07'54.85''$ O y a una elevación de 1307 msnm.

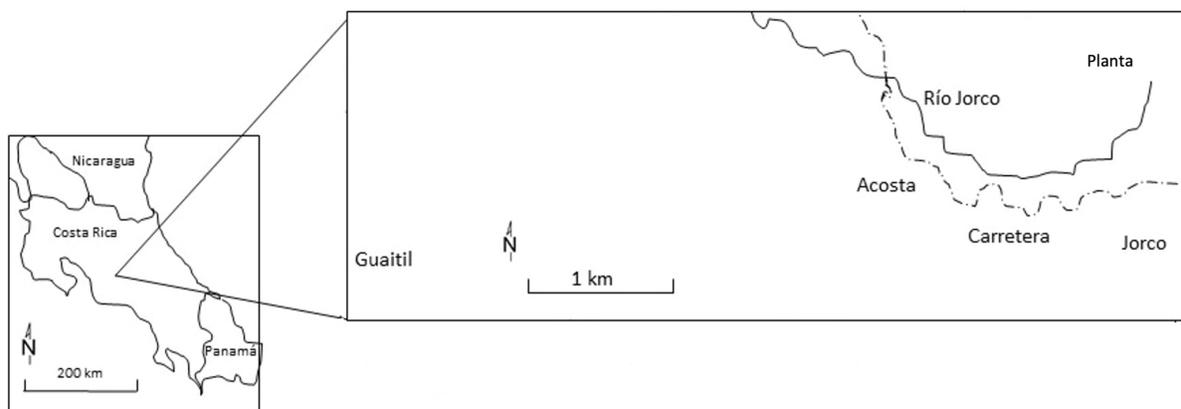


Figura 1. Localización de la planta de tratamiento El Cedral, San Ignacio, Acosta, San José, Costa Rica.

La cuenca del Río Jorco comprende un área montañosa de $5,6 \text{ km}^2$ con un 74,6% de bosque maduro, un 16,8% de pastos para actividades agropecuarias como la ganadería y el cultivo del café, y solo un 7,8% de uso urbano [10]. Costa Rica, al ser una zona tropical, comprende una época seca y lluviosa bien definidas, donde la primera se extiende de diciembre hasta marzo y la segunda desde mayo a octubre; los meses de abril y noviembre son de transición [11]. Según estos mismos autores, se da una disminución relativa en la cantidad de lluvia en julio y agosto (veranillo o canícula) y con los meses más lluviosos en setiembre y octubre. Lo último, debido principalmente a la influencia de los sistemas ciclónicos y los vientos Monzones provenientes del océano Pacífico ecuatorial y las brisas marinas [11].

La PP El Cedral trata un caudal de 16 L/s, abasteciendo una población aproximada de 4030 habitantes. El proceso de tratamiento consiste en 7 pasos (figura 2): 1) un sistema de captación por medio de rejillas, 2) un desarenador, 3) una etapa de coagulación a base de sulfato de aluminio operado a una dosis de 20 mg/L durante este estudio, 4) un floculador de flujo horizontal, 5) dos unidades de sedimentación con un período de retención de 32 minutos, 6) 4 filtros de arena y antracita con periodo de retención de 19 minutos cada una, y 7) un sistema de desinfección con cloro gas.

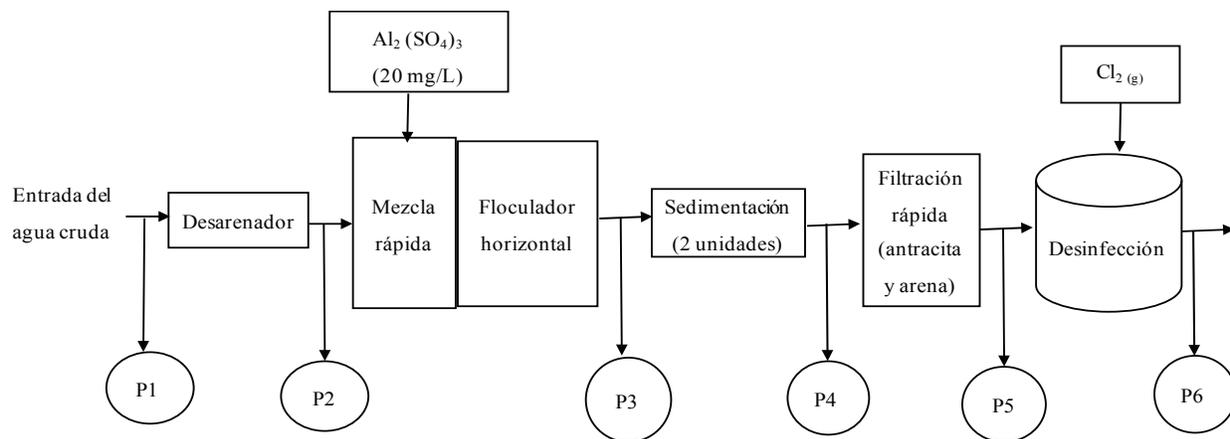


Figura 2. Esquema de la planta de tratamiento del río Jorco y los puntos de muestreo (P: punto de muestreo).

Muestreo del agua cruda y el sistema de tratamiento

El sistema fue monitoreado mensualmente en cada etapa del proceso (figura 2) de marzo de 2015 a febrero de 2016. Se tomaron muestras (una por punto) del agua cruda (P1), de la salida del desarenador (P2), después de la coagulación/floculación (P3), a la salida del sedimentador (P4), luego de la filtración (P5) y finalmente, una vez clorada el agua (P6). Todos los muestreos fueron simples y llevados a cabo entre las 10 am y las 12 md. Las muestras se preservaron en hielo para su posterior análisis en el laboratorio. Se determinaron en el laboratorio los parámetros COD, COT y absorbancia $\text{UV}_{254\text{nm}}$ que se describen posteriormente. Además, se determinaron *in situ* temperatura, pH, turbidez y color en todos los puntos de muestreo.

Monitoreo de la MON en la red de distribución y formación de trihalometanos (THMs)

Se realizaron dos muestreos a la red de distribución de agua potable que abastece a San Ignacio de Acosta en febrero y junio de 2016 (época seca y lluviosa, respectivamente). Los puntos muestreados fueron el agua tratada y clorada, un tanque de almacenamiento a 5 km, otro tanque a 8 km, dos cañerías: una a 16 km y otra en la última residencia abastecida a 21 km de la planta (figura 1; cuadro 4). En el sitio se determinó el pH, la temperatura, la turbiedad, el color aparente y el cloro residual. También, se tomaron muestras para ser analizadas posteriormente en el laboratorio, a saber: COD, absorbancia UV_{254} y con estas se calculó el indicador SUVA, además, se cuantificaron trihalometanos totales. Dichas muestras se preservaron de igual forma como las muestras de la planta potabilizadora. Los muestreos fueron puntuales y se efectuaron durante la mañana.

Métodos de análisis físicos y químicos

En el laboratorio, fueron analizados los parámetros característicos de materia orgánica natural: COD, COT y absorbancia UV 254nm. Para cuantificar COT y COD se utilizó un equipo marca Teledyne Tekmar TOC modelo Fusion; se siguió el método SM5310 C del Standard Methods [12]. El límite de detección y cuantificación fue de 0,03 y 0,05 mg C/L, respectivamente. Para la determinación de COD las muestras se filtraron usando una membrana de nitrato de celulosa de 0,45 μm . Se determinó la absorbancia UV 254nm usando un espectrofotómetro marca Shimadzu UV 1800 ENG120V y siguiendo el método 5910B del Standard Methods [12]. A partir de los valores de UV_{254} y concentraciones de COD obtenidas, se calculó la absorbancia de luz ultravioleta específica (SUVA).

Los THMs: cloroformo, bromoformo, dibromoclorometano y bromodiclorometano fueron determinados mediante el método 6040 D del Standard Methods [12] utilizando un equipo Agilent 7890A. Los límites de detección y cuantificación respectivos fueron 0,2 µg/L, 0,06 µg/L, 0,04 µg/L, 0,06 µg/L y 0,6 µg/L, 0,2 µg/L, 0,15 µg/L, 0,2 µg/L.

En el campo se determinó, en todos los puntos de muestreos, el pH usando un equipo Hanna HI 8-124, la turbiedad y el color se determinaron con un espectrofotómetro La Motte modelo Smart 2, la temperatura con un equipo marca OAKTON modelo PCD 854 y el cloro libre usando un colorímetro (Pocket Colorimeter II, Hach) y siguiendo el método DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine).

Eficiencia de remoción y estudios de correlación

La eficiencia de remoción en porcentaje (ecuación 1) de MON en términos de COD, COT y UV_{254} de la PP se determinó en cada etapa del tratamiento, así como en el sistema total, durante los meses de muestreo de los dos periodos del año.

$$E(\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

E (%): eficiencia de remoción

C_i : concentración inicial

C_f : concentración final

Los datos obtenidos de UV_{254} , COT y COD se analizaron estadísticamente para determinar alguna correlación que permitiera utilizar la medición UV_{254} como un parámetro de medición simple y de bajo costo sustituto al COT y COD. El método estadístico consistió en el análisis de residuos estandarizados con el software MiniTab versión 16. Por medio de este se realizaron combinaciones de los valores de UV_{254} vs COT y UV_{254} vs COD y se obtuvieron combinaciones de valores con un residuo estándar (desviación estándar). Posteriormente se realizó un análisis del coeficiente de correlación de Pearson por medio del software SPSS versión 19 para comprobar si los datos presentaban correlación entre sí. Finalmente, se graficaron los datos para encontrar la línea de mejor ajuste. Los datos de turbidez y color también fueron comparados con los parámetros mencionados.

Resultados y discusión

Caracterización del agua cruda

La zona de estudio está en región tropical, por tanto, se presentaron variaciones climáticas propias de una época seca y otra lluviosa. Por tal motivo, es de esperar una variación temporal en la calidad del agua cruda que alimenta el sistema de tratamiento y una posible variación de su eficiencia. Durante el periodo muestreado los valores de COT y COD fueron similares entre sí (Figura 3). Esto indica que el COT se compone principalmente de COD, estando ausente el carbono orgánico particulado, coincidiendo con Reckhow & Singer [13] que señalan que el COD forma entre el 90% al 99% de la MON en las aguas superficiales utilizadas para agua potable. Además, la Figura 3 muestra las variaciones del contenido de MON a lo largo del periodo estudiado en función de la precipitación. Se cuantificaron concentraciones de 0,41-0,48 mg-C/L de COT y COD en el periodo marzo-abril. Al inicio de las lluvias en los meses de mayo y junio se presentó un aumento de MON con valores de 0,53 a 0,77 mg-C/L de COT y COD. Sin

embargo, para el mes de julio las concentraciones disminuyeron alcanzando valores similares a los meses secos, cercanos a 0,40 mg-C/L para COT y COD. Lo anterior pudo deberse a que en el mes de julio el fenómeno de El Niño ocasionó la extensión del período de Veranillo. Para los meses de agosto a octubre, los más lluviosos del año, las concentraciones de COT y COD estuvieron entre 0,57 y 0,96 mg-C/L. En el mes de noviembre los valores de MON disminuyeron a cerca de 0,50 mg-C/L esto relacionado con la disminución de las precipitaciones. Los meses de diciembre y enero presentaron nuevamente valores cercanos a 0,40 mg-C/L. Conforme lo expuesto, durante todo el periodo, la influencia del período lluvioso en la concentración de MON fue mayor, debido a que la materia orgánica alóctona es transportada al río por escorrentía incrementando las concentraciones presentes.

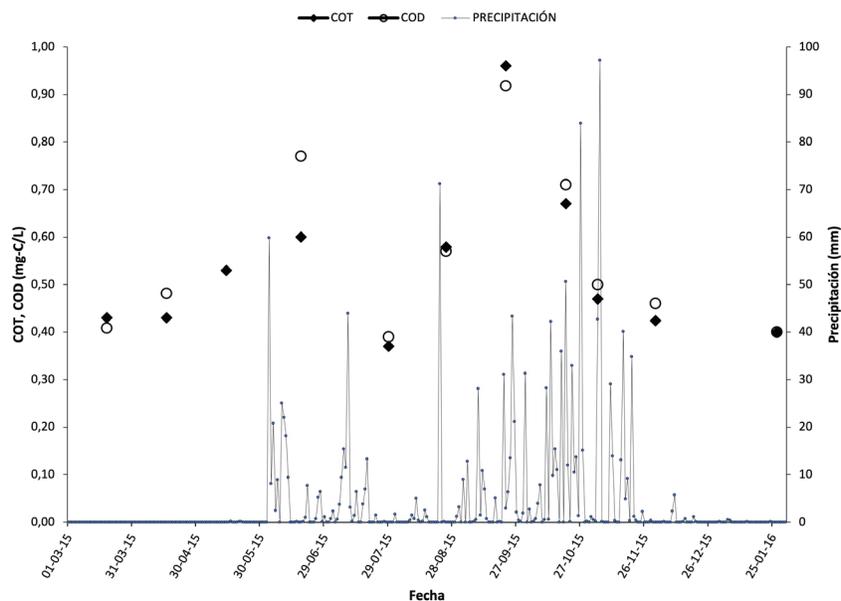


Figura 3. Variación de la MON del agua cruda con la precipitación (Marzo 2015-enero 2016).

Otro aspecto importante por considerar es el tipo de MON presente en el agua a tratar, porque de este depende su reactividad con el cloro u otros oxidantes. En este estudio los parámetros UV_{254} y SUVA permitieron estudiar esta variable. Ambos parámetros presentaron valores relativamente bajos durante la época seca de alrededor de $0,0106\text{ cm}^{-1}$ y $2,00\text{ L/mg-m}$ respectivamente, y un incremento durante la época de lluvia con valores cercanos a $0,250\text{ cm}^{-1}$ y $3,00\text{ L/mg-m}$. Según Reckhow & Singer [13] los valores bajos de SUVA y UV, durante la época seca, indican la presencia de una alta fracción de MON no húmica de elevado carácter alifático, bajo carácter hidrofóbico y bajo peso molecular. Los mismos autores indican la presencia de una mezcla de MON húmica y no húmica, de carácter aromático y alifático y de bajo a alto peso molecular asociada a los valores de SUVA y UV más altos observados cuando se inició la época lluviosa. Además, dichos autores esperarían una remoción de COD por el tratamiento convencional de 20-40% en el primer caso y de 40-60% en el segundo caso.

Remoción de MON total en la planta de tratamiento

La planta potabilizadora, tal como se esperaba, produce agua con un pH apropiado y es eficiente en la remoción de turbidez y color (cuadro 1). Sin embargo, las condiciones óptimas para remover turbidez y color no siempre son las mismas que para remover MON [4]. El presente estudio se centró en evaluar la capacidad del sistema convencional para la remoción de MON.

Cuadro 1. Valores promedio de parámetros físicos en el influente y el efluente de la planta potabilizadora El Cedral para el período 03-2015 a 01-2016 (N=11).

Parámetro	Agua cruda	Agua tratada	Norma (M.S., 2019) [14]	
			VA ^c	VMA ^c
pH	8,16 ^a ± 0,07 ^b	7,46 ± 0,12	6,0	8,0
Turbiedad (UTN)	3,1 ± 3,0	0,09 ± 0,30	1,0	5,0
Color aparente (U-Pt-Co)	21 ± 18	0,36 ± 0,92	<5	15
Temperatura (°C)	19,0 ± 0,8	18,7 ± 0,9	18	30

^apromedio. ^bdesviación estándar. ^cPara los parámetros de pH y temperatura, se establece rangos permisibles y no VA ni VMA. VA: Valor alerta. VMA: Valor máximo admisible.

A continuación, se presentan los resultados de eficiencia de remoción de la planta El Cedral en términos de COD, en tanto que el agua cruda del río Jorco se compone principalmente de COD y además, que este parámetro es el más ampliamente reportado en la literatura. También se muestra la remoción de MON en términos de la absorbancia UV_{254} y de SUVA. La cantidad y composición de la MON son específicas del lugar, esto es, dependen del clima, geología y topografía [1]. Además, la composición de la MON varía tanto espacial como temporalmente [1]. Por lo anterior, en el Cuadro 2 se enlistan primero las eficiencias de plantas potabilizadoras de regiones tropicales (Indonesia, Nicaragua, Singapur) y luego de regiones no tropicales (Australia, Corea del Sur y Sudáfrica). Finalmente, se reporta la eficiencia de remoción de este estudio.

Cuadro 2. Comparación de la eficiencia de remoción total de materia orgánica en la planta El Cedral con respecto a otros sistemas de tratamiento convencional.

Fuente	Concentración inicial (COD) (mg/L)	Remoción COD (%)	Remoción UV_{254} (%)	Remoción SUVA (%)	Referencia
Río Cikapundung, Indonesia	3,82-8,01	53,27-55,96	56,10-88,58	-0,39-69,87	[7]
Río Fonseca-Planta Boaco. Nicaragua	7,6 ± 5,1	53	78	32	[5]
Reservorio, Singapur	3,27-7,45	45	N.D.	N.D.	[6]
Río Murray-Planta Happy Valley. Australia	10 – 11,8	47	N.D.	N.D.	[15]
Río Han. Planta Gueui. Seúl, Corea.	2,1	26	61	48	[16]
Represa Vaal, Suráfrica	5,0	23,5	61,3	59	[17]
Río Jorco-Planta El Cedral. Costa Rica	0,57 ± 0,20	32	51	32	Este estudio

N.D.: No disponible.

Para la planta El Cedral, el cuadro 2 muestra que en promedio, el COD del agua cruda durante el periodo de estudio, fue de $0,57 \pm 0,20$ mg C/L y en el agua tratada fue de $0,37 \pm 0,06$ mg C/L, equivalente a un 32% de remoción. Según los estudios presentados en el Cuadro 2 para zonas tropicales, esta eficiencia es bastante menor a la reportada para plantas de

tratamiento convencionales en Indonesia, Nicaragua y Singapur, con eficiencias del 56, 53 y 45%, respectivamente. Para los casos en zonas de clima temperado, Australia, Corea del Sur y Sudáfrica, con porcentajes de remoción del orden de 47, 26 y 23,5% respectivamente, los dos últimos casos son muy similares al reportado en este estudio. Es de esperar que el tipo de MON en las plantas potabilizadoras de zonas temperadas (e incluso las de zonas tropicales) sea diferente a la del río Jorco. Las mayores eficiencias de remoción de COD reportadas se debe, probablemente, a las mayores concentraciones de COD del agua a tratar. Lo anterior concuerda con lo reportado por Sillampää et al. [18] donde indican que la efectividad de un sistema de tratamiento depende de la concentración inicial, las características de la MON y las propiedades físico-químicas del agua a tratar.

Según el cuadro 2, la planta El Cedral muestra una reducción de MON aromática de 51% con base a la absorbancia UV_{254} . Eficiencias comparables se observan en las plantas tanto de zonas tropicales (Indonesia) como temperadas (Corea del Sur y Sudáfrica). El otro parámetro que muestra la reducción de MON aromática es el SUVA (pero en menor magnitud al UV_{254}), tanto en las plantas de zonas tropicales como temperadas. Para este estudio, la MON del agua cruda varió de no húmica, de alto carácter alifático, bajo carácter hidrofóbico y bajo peso molecular durante la época seca, a una mezcla de MON húmica-no húmica, aromática-alifática y de bajo a alto peso molecular durante la época lluviosa. Lo anterior se refleja en un valor promedio en el agua cruda de $0,0151 \pm 0,0085 \text{ cm}^{-1}$ y $2,37 \pm 0,98 \text{ L/mg-m}$ para UV_{254} y SUVA, respectivamente. Después del tratamiento se presentó una reducción de 51% y 32%, respectivamente para obtener $0,0073 \pm 0,0037 \text{ cm}^{-1}$ y $1,70 \pm 0,59 \text{ L/mg-m}$. Los datos sugieren que durante el tratamiento convencional se dio la remoción preferencial de la materia orgánica aromática, de carácter hidrofóbico y de bajo a alto peso molecular. La capacidad de los sistemas convencionales para remover preferencialmente la fracción hidrofóbica de la MON ha sido demostrada por Kim & Yu [16].

Además de observar los datos globales de remoción del sistema de tratamiento es importante determinar la contribución independiente para cada etapa de tratamiento, tanto en la cantidad de carbono total o disuelto como el tipo de MON removida de forma preferencial.

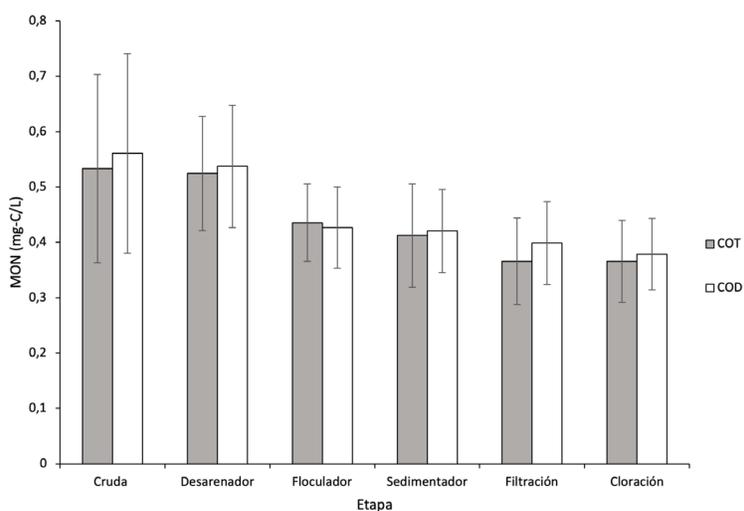


Figura 4. Concentración de la MON (mg-C/L) en cada etapa del sistema de tratamiento de la planta. El Cedral.

Cuadro 3. Eficiencias de remoción de MON en las diferentes etapas del tratamiento de la planta El Cedral.

ETAPAS	COT (%)	COD (%)	UV ₂₅₄ (%)	SUVA
Desarenador	2,0	4,0	0,3	-1,4
Coagulación/floculación/Sedimentación	21	22	38	21
Filtración	11	5	4	-3,2

En la figura 4 y el cuadro 3 se observa la concentración de materia orgánica en el agua durante su tratamiento en cada etapa de la planta potabilizadora. La etapa del desarenador presenta una eficiencia de remoción muy baja de COT y COD de 2% y 4%, respectivamente. Lo anterior se explica dado que en esta etapa se da principalmente la remoción de partículas por sedimentación. La etapa de coagulación-sedimentación es la que presenta mayor eficiencia de remoción para ambos parámetros de MON, siendo 21% para el COT y 22% para el COD (cuadro 3). Lo anterior confirma que la coagulación es la etapa del tratamiento que tiene mayor influencia en la eliminación de la MON del agua al complementarse con la sedimentación [18]. Durante el proceso de coagulación, según Matilainen et al. [4], se puede dar la combinación de varios mecanismos de remoción como; neutralización de cargas, atrapamiento, adsorción y formación de complejos con los iones metálicos del coagulante, para formar agregados insolubles. Además, el 22% de remoción de COD observado es cercano al 25-50%, el cual es lo normal en un proceso de coagulación con sulfato de aluminio en agua cruda con SUVA entre 2 y 4 [13].

En la etapa de filtración, la remoción observada fue del 11 % para el COT y 5% para el COD. Lo que muestra que la filtración es la segunda etapa de mayor eficiencia en la remoción de la MON reteniendo en los filtros de arena-antracita los flóculos que han quedado después de la etapa de coagulación-sedimentación. Además, la remoción de COD observada en los filtros rápidos puede deberse a adsorción en los flóculos y biodegradación, esta última es la principal forma de remoción de MON en filtros rápidos [1].

Según el cuadro 3, durante la etapa de coagulación-floculación se dio la mayor reducción de los parámetros UV₂₅₄ y SUVA, indicando la remoción preferencial de la fracción de MON hidrofóbica con alto contenido aromático. Según Tak & Vellanki [1], el alto contenido aromático de la MON hidrofóbica posee una alta densidad de carga y un alto nivel de cargas negativas originadas en grupos carboxílicos y fenólicos. Por tanto, según los mismos autores, dicha fracción de MON tiende a dominar la carga coloidal presente en el agua y por tanto es más susceptible a ser removida por los procesos de coagulación.

Parámetros sustitutos al análisis de COT y COD

Considerando que para la cuantificación del COT y COD son necesarios equipos y personal especializado, se requiere encontrar parámetros simples que permitan estimar la presencia y tipo de MON. En este estudio, se encontraron correlaciones positivas entre los siguientes pares de parámetros: COT vs color, COD vs color, COT vs turbidez, COD vs turbidez, color vs UV₂₅₄, turbidez vs UV₂₅₄, y COT vs COD. Sin embargo, los índices de correlación fueron inferiores a 0,50, excepto en el último caso que, como era de esperar, fue de 0,77. Como posible parámetro para sustituir el análisis de COT y/o COD se encontraron correlaciones con UV₂₅₄ con un nivel de significancia mayor al 99% en ambos casos. Lo anterior luego de efectuar el análisis de correlación de Pearson con los valores seleccionados según se indica en la metodología, tanto para COT vs UV₂₅₄ como para COD vs UV₂₅₄. En las Figuras 5 y 6 se observa una correlación lineal entre el COT y la absorbancia UV₂₅₄ ($r^2 = 0,64$) y una correlación exponencial entre el COD y UV₂₅₄ ($r^2 = 0,61$) para todos los puntos de los 11 muestreos realizados. Según Reckhow y Singer [13], estos valores son menores a los reportados en otras investigaciones que hacen

referencia a la medición de la luz UV₂₅₄ como un parámetro sustituto y predictor de COT con coeficientes de correlaciones de 0,88 y 0,95. Sin embargo, la medición de la absorbancia de UV₂₅₄ facilitaría la determinación simple de la presencia de MON tanto como COT como COD y podría indicar si hay un cambio brusco en esos parámetros.

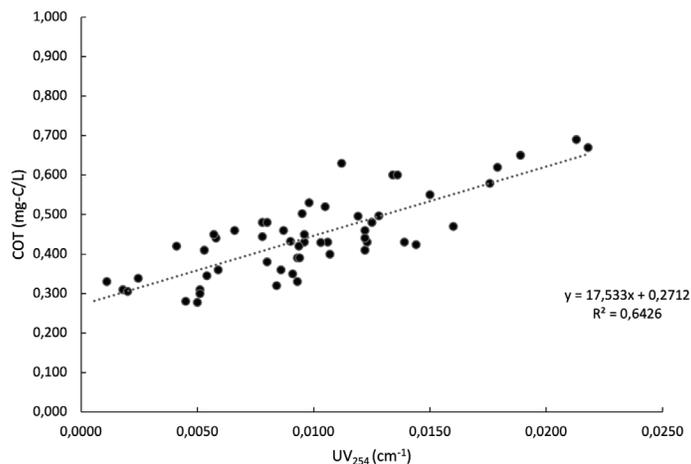


Figura 5. Correlación entre COT y UV₂₅₄ para el agua cruda de la planta potabilizadora El Cedral.

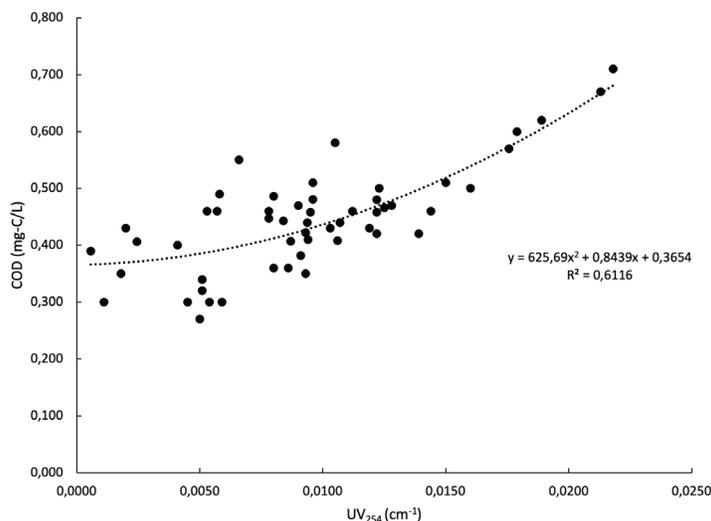


Figura 6. Correlación entre COD y UV₂₅₄ para el agua cruda de la planta potabilizadora El Cedral.

Comportamiento del MON y formación de THMs en la red de distribución

El agua cruda del río Jorco presentó concentraciones bajas de MON que posteriormente fueron reducidas aún más por medio del sistema de tratamiento convencional instalado. No obstante, es importante, una vez clorada el agua, caracterizar el agua en términos de cloro libre y MON a lo largo de la red y su capacidad de formar THMs.

En el cuadro 4 se observa que a lo largo de la red se detectó la presencia de cloro en niveles apropiados para desinfección, desde 1,0 mg Cl₂/L a la salida de la planta hasta 0,64 mg Cl₂/L, al final de esta, luego de 21 km de red. De forma similar, en todo el transcurso se detectó MON entre 0,28 y 0,44 mg-C/L como COD. Considerando lo anterior, es de esperar la presencia de

THMs en la red, según el Cuadro 4, la concentración de THMs totales a 5 km del punto de cloración fue de 4,39 µg/L, incrementándose hasta 11,16 µg/L en el último punto de muestreo de la red, en el km 21. Estas concentraciones detectadas están muy por debajo de lo que se estipula en la legislación nacional, con 200 µg/L para solo cloroformo por ejemplo [14]. Las bajas concentraciones de THMs totales encontradas se explican, además de las bajas concentraciones de COD mencionadas, por el valor de SUVA (1,97 a 1,34 L/mg-m). Según Tak y Vellanki [1], dichos valores inferiores a 2 L/mg-m se asocian a MON no húmica, constituida de compuestos orgánicos hidrofílicos de bajo peso molecular que no tiene correlación significativa con la formación de THMs. Además, esa reducción de SUVA confirma que en el proceso de potabilización se removió preferencialmente la materia orgánica aromática, hidrofóbica y de bajo a alto peso molecular que sería la responsable de la formación de DBPs [1].

Cuadro 4. Parámetros relacionados con la formación de THMs encontrados en la red de distribución de agua potable El Cedral.

Punto de muestreo (km)	Parámetro					
	Cl ₂ residual (mg/L)	COD (mg/L)	SUVA (L/mg-m)	CHCl ₃ (µg/L)	CHBrCl ₂ (µg/L)	THMs totales* (µg/L)
Cruda (0)	N.A.	0,50±0,06	2,58±0,09	N.A.	N.A.	N.A.
Filtrada (0)	N.A.	0,38±0,06	1,59	N.A.	N.A.	N.A.
Clorada (0)	1,10 ^a ±0,01 ^b	0,28±0,06	1,97±0,02	N.A.	N.A.	N.A.
Oficinas AyA (5)	0,89±0,08	0,38±0,08	1,53±0,32	3,27 ±0,54	1,12 ±0,27	4,39±0,60
Calderones (8)	0,68±0,01	0,32±0,06	1,70±0,30	N.D.	N.D.	N.D.
Guaitil (16)	0,73±0,02	0,42±0,13	144±0,06	4,80 ±0,53	1,00 ±0,27	5,80±0,59
Coyolar (21)	0,64±0,13	0,44±0,06	1,34±0,20	9,72 ±0,54	1,44±0,27	11,16±0,60

N.A.: No aplica; N.D.: No detectable. *CHBr₃ y CHBr₂Cl no fueron detectados en ninguna muestra. a: promedio; b: desviación estándar.

Conclusiones

La efectividad en la remoción de MON utilizando tratamiento convencional con sulfato de aluminio ha sido ampliamente estudiado en regiones templadas y en algunas plantas a nivel tropical, pero existen pocos datos en Costa Rica. Por tanto, el objetivo principal de este estudio fue determinar la capacidad de remoción de MON en la planta de tratamiento convencional de El Cedral en el río Jorco, en San José, utilizando sulfato de aluminio como coagulante. Los resultados mostraron que agua cruda con 0,96 ± 0,19 mg-C/L de COD, el sistema de potabilización pudo remover alrededor del 32%, mostrando eficiencias semejantes a las observadas en zonas templadas, para concentraciones bajas de COD. Además, en la etapa de coagulación-floculación se dio una disminución de UV₂₅₄ y del parámetro SUVA, indicando la reducción de MON aromática e hidrofóbica con menos potencial para formar THMs. Lo anterior, en conjunto con la baja concentración de COD, explica los bajos valores de THMs encontrados en el agua a lo largo de la red de distribución. Finalmente, se determinó una buena correlación entre COT y COD con UV₂₅₄, lo que sugiere que se puede usar este parámetro de medición simple y económico como sustituto de la medición del carbono orgánico.

Agradecimientos

Los coautores agradecemos al profesor PhD Guillermo Calvo Brenes por su colaboración en la modelación de las correlaciones entre los diferentes parámetros de MON.

Referencias

- [1] S. Tak and B.P. Vellanki "Natural organic matter as precursor to disinfection byproducts and its removal using conventional and advanced processes: state of the art review", *J. of Water and Health*, vol. 16, no. 5, pp. 681-703, Oct., 2018. doi: 10.2166/wh.2018.032
- [2] J. Arboleda, *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: (R. Pertuz Ed.) 3era ed., McGraw Hill, 2000.
- [3] M. Popov, M. Kragulj, J. Molnar, A. Tubić, M. Watson, M. Šćiban, J. Agbaba, "Fate of natural organic matter and oxidation/ disinfection by-products formation at a full-scale drinking water treatment plant", *Env. Technol.*, Feb., 2020. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1732474>
- [4] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, M. Sillanpää, "Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review", *Adv. in Colloid and Interface Sci.* vol. 159, pp. 189-197, Jun., 2010. doi:10.1016/j.cis.2010.06.007
- [5] I. García "Removal of natural organic matter by enhanced coagulation in Nicaragua", Licentiate thesis, Chem. Eng. and Technol. Dept., Royal Inst. of Technol., Stockholm, Sweden, 2005.
- [6] J. Qin, M. Oo, K. Kekre, F. Knops, P. Miller, "Impact of coagulation pH on enhanced removal of natural organic matter in treatment of reservoir water", *Sep. and Purif. Technol.* Vol. 49, pp. 295-298, Sept. 2006. doi:10.1016/j.seppur.2005.09.016
- [7] M. Sururi, S. Notodarmojo, D. Roosmini, P. Putra, Y. Maulana, M. Dirgawati, "An Investigation of a Conventional Water Treatment Plant in Reducing Dissolved Organic Matter and Trihalomethane Formation Potential from a Tropical River Water Source", *J. Eng. Technol. Sci.* vol. 52, no. 2, pp. 271-288, Apr. 2020. DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.2.10
- [8] D. Mora-Alvarado, C. Portuguese-Barquero, "Agua para consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2016. Metas al 2022 y al 2030", *Tecnol. en Marcha*. vol. 31-2, pp. 72-86, Apr-Jun., 2018. DOI: 10.18845/tm.v31i2.3625
- [9] A. Lazo, Comunicación personal, UEN Investigación y Desarrollo, Inst. Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 02 Nov. 2020.
- [10] UEN Investigación y Desarrollo, Inst. Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, *Informe del proyecto: Aplicación de modelos de simulación y análisis geoespacial-ambiental para el estudio de tendencias en la cobertura y uso de la tierra y la dinámica del ecosistema en treinta y dos (32) cuencas hidrográficas de Costa Rica; Cuenca Río Jorco* 18 Oct. 2018, pp.51-52
- [11] Instituto Meteorológico Nacional (2008). *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica* [Online]. Available: <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/CambioClimatico/climaVariabilidadCambioClimaticoCR.pdf>
- [12] APHA, AWWA, WPCF, *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21a ed., Am. Public Health Assoc., WA, EUA, 2005.
- [13] D.A. Reckhow, and P.C. Singer "Formation and control of disinfection by-products" in: *Water quality & treatment. A handbook on drinking water*, 6th ed., Denver, CO: Edzwald (ed), 2011, pp. 19.1-19.59.
- [14] M.S. "Reforma y adición al Decreto Ejecutivo no. 38924-s del 12 de enero del 2015" *Reglamento para la Calidad del Agua Potable*. Alcance No. 15 a la Gaceta No. 15 del 22-01-2019. pp 2-16
- [15] C. Chow, R. Fabris, M. Drikas, M. Holmes, "A case study of treatment performance and organic character", *J. of Water Supply: Research and Technol.* vol 54, no. 6, pp. 385-395, Jul., 2005.
- [16] H. Kim and M. Yu, "Characterization of natural organic matter in conventional water treatment processed for selection of treatment processed focused on DBPs control", *Wat. Res.* vol. 39, pp. 4779-4789, Sept., 2005.
- [17] S. Marais, E. Ncube, T. Msagati, B. Mamba, T. Nkambule, "Comparison of natural organic matter removal by ultrafiltration, granular activated carbon filtration and full scale conventional water treatment", *J. of Env. Chem. Eng.* vol. 6, pp. 6282-6289, Oct., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.002>
- [18] M. Sillanpää, M. Ncibi, A. Matilainen, M. Vepsäläinen, "Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review", *Chemosphere*, vol. 190, pp. 54-71, Sept., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.113>

Secado de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* utilizando radiación de microondas

Drying of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* using microwave radiation

Simón E. Luckert-Froget¹, Pedro R. Benítez-Díaz², Styles W. Valero³,
Williams J. León-Hernández⁴, Ilvania Gutiérrez-Gotera⁵

Fecha de recepción: 28 de febrero de 2021
Fecha de aprobación: 3 de agosto de 2021

Luckert-Froget, S.E; Benítez-Díaz, P.R; Valero, S.W; León-Hernández, W.J; Gutiérrez-Gotera, I. Secado de pinus caribaea var. Hondurensis utilizando radiación de microondas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 61-75.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5435>

- 1 Departamento de Tecnología de Productos Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: simon.luckert.fr@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5672-6626>
- 2 Laboratorio de Química, Departamento de Botánica y Ciencias Básicas, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: prbe@ula.ve
 <https://orcid.org/0000-0002-4316-2697>
- 3 Sección de Propiedades de la Madera, Laboratorio Nacional de Productos Forestales, Departamento de Tecnología de Productos Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: styles@ula.ve
 <https://orcid.org/0000-0002-6467-6355>
- 4 Laboratorio de Anatomía de Maderas, Departamento de Botánica y Ciencias Básicas, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: wleon@ula.ve
 <https://orcid.org/0000-0002-9817-6463>
- 5 Sección de Pulpa y Papel, Laboratorio Nacional de Productos Forestales, Departamento de Tecnología de Productos Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: ilgutie@ula.ve
 <https://orcid.org/0000-0001-4350-479X>



Palabras clave

Anatomía de madera; ahorro energético; extracción de humedad; propiedades físicas; propiedades mecánicas; radiofrecuencia.

Resumen

Se desarrolló una metodología de secado para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, empleando horno de microondas doméstico (HMO), consistente de pulsos de radiación y períodos de enfriamiento, que consume 92% menos energía y 58% menos tiempo. Las propiedades físicas y mecánicas se midieron en condición seca al HMO, equilibrio higroscópico (EH) y secado convencional, ρ_{verde} : 1049 ± 74 kg/m³ (CH: 107 ± 18 %), ρ_{secaHMO} : 555 ± 63 kg/m³, ρ_{EH} : 565 ± 51 kg/m³ (CH: $11,3 \pm 0,8$ %), V_{verde} : $58 \pm 1 \times 10^{-6}$ m³ y V_{HMO} : $51 \pm 26 \times 10^{-6}$ m³ y contracción volumétrica: 11 ± 3 %, no presentando diferencias significativas con respecto al secado convencional. Los valores de la compresión paralela al grano fueron: ELP_{HMO} : $6 \pm 2 \times 10^6$ kg/m², MR_{HMO} : $6 \pm 2 \times 10^6$ kg/m² y MOE_{HMO} : $4 \pm 1 \times 10^8$ kg/m², ELP_{EH} : $3,0 \pm 0,5$ kg/m², MR_{EH} : $3,5 \pm 0,64$ kg/m² y MOE_{EH} : $2,3 \pm 0,6$ kg/m²; tampoco mostraron diferencias con respecto al secado convencional. La única alteración anatómica observada fue un aumento de agrietamientos espiralados en las paredes de las traqueidas y no parece tener repercusión sobre las propiedades evaluadas. Se concluyó que la exposición al microondas no altera las propiedades estudiadas siendo un método confiable de secado.

Keywords

Energy saving; moisture extraction; mechanical properties; physical properties; radiofrequency; wood anatomy.

Abstract

A methodology was developed for drying *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, using a domestic microwave oven (HMO) consisting of radiation pulses and cooling periods and consumes 92% less energy and 58% less time. The physical and mechanical properties were measured in the dry condition of HMO, hygroscopic equilibrium (HE) and conventional drying, ρ_{green} : 1049 ± 74 kg/m³ (CH: 107 ± 18 %), ρ_{dryHMO} : 555 ± 63 kg/m³, ρ_{EH} : 565 ± 51 kg/m³ (CH: 11.3 ± 0.8 %), V_{green} : $58 \pm 1 \times 10^{-6}$ m³, V_{HMO} : $51 \pm 26 \times 10^{-6}$ m³, and volumetric contraction: 11 ± 3 %, which do not present significant differences with respect to conventional drying. The values of compression parallel to the grain were: ELP_{HMO} : $6 \pm 2 \times 10^6$ kg/m², MR_{HMO} : $6 \pm 2 \times 10^6$ kgm² and MOE_{HMO} : $4 \pm 1 \times 10^8$ kg/m², ELP_{EH} : $3,0 \pm 0.5$ kg/m², MR_{EH} : $3,5 \pm 0.64$ kg/m² and MOE_{EH} : $2,3 \pm 0.6$ kg/m², and not show differences with respect to conventional drying. The only anatomical alteration observed was an increase in spiral cracks in the walls of the tracheids and does not seem to have an impact on the evaluated properties. It was concluded that microwave exposure does not alter the studied properties and is a reliable method for drying.

Introducción

Para adecuarse a los retos impuestos por las metas de desarrollo sostenible establecidas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el sector forestal ha tenido que introducir innovaciones importantes en el aprovechamiento de los recursos naturales y la industria de transformación de la madera, así como dirigir esfuerzos hacia la disminución del consumo energético [1, 2]. Dentro de este contexto, se ha identificado que uno de los problemas de mayor importancia para la industria forestal es la gran inversión de energía que conlleva la

extracción de la humedad de la madera, este proceso es de vital importancia debido a que influye directamente sobre su preservación, durabilidad y propiedades físico-mecánicas. Se ha estimado que un secado típico de coníferas a partir de la condición verde (madera recién cosechada) consume entre 0,64 y 0,73 kWh L⁻¹ de agua evaporada, necesitando entre 150 y 215 horas (6 a 9 días) para completar el proceso [3].

En la industria venezolana, se extrae la humedad de la madera empleando cámaras de secado calentadas a través de calderas que utilizan combustible fósil para su funcionamiento, con la subsecuente emisión de gases efecto invernadero, en otros países pueden emplear gas o biomasa. Este proceso consume mucho tiempo y energía debido a que el secado se basa en el calentamiento por conducción, el cual se inicia en la superficie de las piezas, teniendo que vencer la resistencia térmica del material para alcanzar su centro, razón por la cual hay que ser muy cuidadoso para evitar el sobre secado de las regiones superficiales y mantener la integridad estructural [4, 5]. Esta metodología está bien caracterizada y a pesar de los problemas de eficiencia debido a las pérdidas inherentes a los fenómenos de transferencia de calor, se han podido establecer horarios de secado con rigurosos controles de temperatura para prevenir los defectos por pérdida de agua, además de tener la capacidad de procesar altos volúmenes de madera en una sola carga.

A escala de laboratorio, bien sea con fines de investigación o para control de calidad y procesos, se requiere secar probetas de madera para realizar diferentes tipos de ensayos físico-mecánicos, para lo cual se emplean estufas u hornos eléctricos que deben permanecer encendidos veinticuatro horas al día. Aunque el volumen de material es mucho menor, la forma en que se lleva a cabo el secado es la misma y conlleva un consumo de energía que podría alcanzar los 28,8 kWh día⁻¹, requiriéndose en el mejor de los casos de dos a tres días para completar el proceso [1].

Dentro de este contexto, en la búsqueda de una mayor eficiencia y sostenibilidad, se ha planteado la posibilidad de utilizar fuentes de energía alternativa para extraer la humedad de la madera. Una de las opciones más frecuentemente utilizadas, sustentadas dentro de los preceptos de la química e ingeniería verde, es la radiación de microondas, la cual está siendo empleada a escala industrial para la esterilización y secado de los más diversos materiales [5, 6]. Su principal ventaja es que este tipo de energía radiante calienta volumétricamente, de manera uniforme y con una eficiencia de 50 a 70 %, en comparación con el 10 % de los hornos convencionales [7, 8]. Esto se debe a que actúa directamente sobre las moléculas de agua, lo cual permite alcanzar la temperatura adecuada para extraer la humedad de la madera mucho más rápido que el secado convencional y, debido a que no es necesario vencer la resistencia térmica, llega más eficientemente al interior de las piezas [4]. Adicionalmente, se ha comprobado que la radiación de microondas puede ser utilizada como un método muy efectivo y eficiente en el tratamiento fitosanitario de la madera, cumpliendo además con las exigencias sanitarias establecidas internacionalmente [8, 9].

La metodología de secado empleando microondas ha sido estudiada en especies como roble blanco (*Quercus alba*), pino noruego (*Pinus abies*) y otras coníferas de zonas templadas, comprobando su mayor eficiencia energética y disminución del tiempo de secado, así como la conservación de las propiedades físico-mecánicas de la madera al compararlas con el secado convencional [10,11,12,13]. Con respecto al pino caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*), el cual es de particular interés debido a que representa aproximadamente el 84,6 % de la producción de madera en rolas en Venezuela y es la más económica disponible para las carpinterías en el país [14], el único estudio que se ha encontrado en la literatura es el realizado por Benítez-Díaz y Gutiérrez-Gotera [1], quienes determinaron el factor seco en astillas para la elaboración de pulpa para papel, utilizando un horno de microondas doméstico, logrando reducir el tiempo total de análisis en 90 % y el consumo de energía en 99 %.

Esta investigación pretende desarrollar un método de secado a escala de laboratorio, para probetas de madera de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W. H. Barrett & Golfari (pino caribe), utilizando radiación electromagnética en el rango de las microondas, alrededor de 2,45 GHz, suministrada a través de un horno de microondas doméstico (HMO). Con la finalidad de evaluar los efectos que la exposición a la energía radiante pudiera tener sobre la estructura y propiedades de la especie empleada, se realizarán algunos estudios de anatomía y pruebas de resistencia paralela al grano.

Materiales y métodos

Materiales y equipos

El material de estudio está representado por madera de pino caribe obtenida de las plantaciones de Uverito, Estado Monagas, Venezuela. Las muestras estaban constituidas por probetas de 2,5 cm de espesor x 2,5 cm de ancho x 10 cm de largo provenientes de un mismo individuo, evitando la presencia de nudos y/o médula, aserradas con sierra cinta y seccionadas con la tronadora. Se seleccionaron al azar un total de 60 probetas, que fueron dispuestas en 4 grupos de 15 para llevar a cabo el trabajo experimental, como se indica en las secciones siguientes. Es importante destacar, que se empleó sólo un individuo debido a que este trabajo constituye la primera aproximación en la caracterización del secado por microondas en pino caribe a escala de laboratorio (empleando probetas), razón por la cual se hace necesario limitar el número de variables inherentes a la naturaleza de la madera.

Con la finalidad de alcanzar el contenido de humedad verde, las probetas se sumergieron en agua durante dos semanas. Luego, antes de iniciar los procesos de secado, las muestras se orearon durante 24 h sobre hojas de papel bond, para retirar el exceso de humedad. Las muestras fueron manipuladas con pinzas durante todo el proceso para evitar alteraciones de los pesos.

Para las pruebas de secado y propiedades físico-mecánicas se utilizaron los siguientes equipos: Horno de microondas doméstico marca Panasonic modelo N° NN-ST678S, 60Hz, 12,7 A, 120 V. Desecador de vidrio con silicagel. Estufa de convección forzada marca Germany GLOBE modelo DOD – A 053 Drying Oven. Balanza digital ANDEK 1200A con exactitud de 0,001 g. Prensa universal para ensayos mecánicos marca WOLPERT, máxima capacidad 5 Ton, modelo U5. Termómetro infrarrojo digital marca FLUKE, modelo 566/568.

Para el estudio de anatomía se utilizaron los siguientes reactivos: safranina y alcohol al 50 % (1:1). Etanol (50 %, 70 %, 75 %, 95 %), alcohol-xilol y xilol, y bálsamo de Canadá. Equipos: Micrótopo. Microscopio óptico marca Leica, modelo Galen III. Cámara digital Pixelink (PL-B681C) acoplada a un microscopio óptico Nikon, modelo Eclipse E200.

Secado en estufa

Se seleccionaron al azar 15 probetas, que se identificaron como grupo control 1 (C1, condición seca al horno), luego de pesarlas y tomar este peso como peso húmedo (*Ph*), fueron secadas a 103 ± 2 °C durante 24 h en estufa a convección forzada e introducidas en un desecador hasta llegar a temperatura ambiente. Paso seguido, se pesaron y llevaron a estufa durante 2 h para luego dejar enfriar en el desecador y pesarlas nuevamente. Este paso se repitió hasta obtener un peso constante, el cual se tomó como peso seco (*Ps*). El grupo C1 se mantuvo en el desecador hasta realizar los estudios físico-mecánicos. Otras 15 probetas, designadas como grupo control 2 (C2, condición en equilibrio higroscópico), se secaron siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, pero después de llegar a peso constante se almacenaron en el cuarto de acondicionamiento a 65 % humedad relativa y 20 °C, hasta alcanzar el equilibrio

higroscópico cuando fueron pesadas nuevamente (peso en el equilibrio higroscópico, P_{eh}). Se determinó el contenido de humedad en porcentaje (CH) para C1 según la ecuación 1 y el contenido de humedad en el equilibrio higroscópico (CH_{eh}) para el grupo C2 según la ecuación 2.

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \quad (1)$$

$$CH_{eh} = \frac{P_{eh} - Ps}{Ps} \times 100 \quad (2)$$

Secado en HMO

Para el secado con HMO se diseñó un esquema de calentamiento por pulsos electromagnéticos y tiempos de descanso, que se muestra en la cuadro 1, tomando como punto de partida el procedimiento previamente desarrollado por Benítez-Díaz y Gutiérrez-Gotera [1]. Esta prueba se realizó sobre 15 probetas expuestas a la radiación en grupos de 5, al conjunto se llamó grupo experimental 1 (E1, condición seca al HMO). Durante este procedimiento se determinó la humedad perdida en cada paso sucesivo de secado ($\%Hp$), de acuerdo a la ecuación 3.

$$\%Hp = \frac{Ph - Pi}{Ps} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

Ph = peso húmedo (g), obtenido antes de iniciar el proceso

Ps = peso seco (g), obtenido al llegar a peso constante

Pi = peso en cada paso de secado

Con los datos recopilados se construyó una curva de pérdida de humedad vs tiempo acumulado de exposición al microondas, con la finalidad de obtener una ecuación que describa el comportamiento del proceso.

Posteriormente, utilizando la ecuación de la curva, se calculó el tiempo de secado al HMO necesario para dejar las probetas alrededor de 12 % de humedad y se procedió al secado de las mismas. Esta prueba se realizó sobre 15 probetas, sometidas al microondas en grupos de 5, al conjunto se llamó grupo experimental 2 (E2, condición en equilibrio higroscópico). Al finalizar el proceso fueron mantenidas en el cuarto de acondicionamiento hasta alcanzar el equilibrio higroscópico.

Las temperaturas alcanzadas después del calentamiento en el HMO, se midieron sobre una probeta testigo seleccionada al azar, utilizando un termómetro infrarrojo, justo al momento de abrir la puerta del horno.

Anatomía de la madera

Se realizó un estudio anatómico comparativo entre las probetas del grupo E1 (condición seca al HMO) y C1 (condición seca al horno), incluyendo también la condición seca al aire como un control adicional. Se midió el diámetro de los conductos resiníferos longitudinales (DCI) y transversales (DCt), la altura de los radios (ARd) y los grosores de las paredes de las traqueídas (GPt). Para tal fin, se prepararon láminas para observación microscópica de las secciones transversal, radial y tangencial de acuerdo al siguiente procedimiento: cada probeta se ablandó en agua hirviendo (4 - 8 h); posteriormente, se realizaron cortes con un micrótopo

de deslizamiento para obtener láminas de 25 a 30 μm de espesor, las cuales fueron teñidas con una solución de safranina y etanol al 50 % durante 4 h. Paso seguido, se deshidrataron por inmersiones sucesivas en etanol de concentración creciente (50 %, 10 min; 70 %, 10 min; 75 %, 10 min; 95 % 2h), alcohol-xilol (45 min) y xilol (2 - 3 h); finalmente, las láminas se montaron utilizando bálsamo de Canadá como elemento adhesivo. La determinación de las características cuantitativas se basó en lo indicado por IAWA Committee [15] en cuanto a definiciones y procedimientos. Se tomaron micrografías con una cámara digital a los caracteres más resaltantes en el análisis comparativo entre las condiciones E1 y C1.

Densidad

Se determinó la densidad (ρ) de cada grupo de probetas, en la condición inicial (verde) y las condiciones finales (secas al HMO o estufa), siguiendo el procedimiento establecido en la Norma DIN-52182 [16]. El ensayo se realizó en 15 probetas de cada grupo y se reportó en kg m^{-3} .

Resistencia a la compresión paralela al grano

Las pruebas de compresión paralela al grano se realizaron siguiendo la norma ASTM (American Society for Testing Materials) D143/253-260 [17]. Posteriormente, se construyó la curva de resistencia paralela al grano donde se identificó el esfuerzo al límite proporcional (ELP kg m^{-2}), la resistencia máxima (RM kg m^{-2}) y el módulo de elasticidad (MOE kg m^{-2}). Para dicha construcción, cada 100 kg de carga se hizo la lectura de la deformación y se construyó la curva carga (kg) vs. deformación (m). Las cuales se calcularon según las ecuaciones 4, 5 y 6:

$$ELP = \frac{P_1}{A} \quad (4)$$

$$RM = \frac{P_2}{A} \quad (5)$$

$$MOE = \frac{P_1 * L}{A * \delta} \quad (6)$$

Donde:

P_1 = carga al límite proporcional (kg)

P_2 = carga máxima o de ruptura (kg)

A = área de la sección transversal de la probeta antes de realizar el ensayo (m^2)

L = distancia sobre la cual se midió la deformación (m)

δ = deformación de la probeta hasta el límite proporcional (m)

Expresión de los resultados

Todos los resultados fueron reportados como el promedio más o menos la desviación estándar ($\bar{x} \pm DS$) con su coeficiente de variación (CV) y se realizó un análisis de varianza (ANOVA de una vía) empleando el programa GraphPadInStat. Para los estudios anatómicos se empleó el mismo procedimiento y las diferencias significativas se determinaron por la prueba de Tukey.

Resultados y discusión

Se desarrolló una metodología de secado de probetas de madera de pino caribe utilizando un HMO doméstico, el cual está basado en calentamiento por pulsos de radiación de corta duración seguida de períodos de descanso, como se muestra en la Cuadro 1. Se utilizó como punto de partida un procedimiento previamente utilizado por Benítez-Díaz y Gutiérrez-Gotera [1] para la determinación del factor seco en astillas de pino caribe, siendo éste el trabajo más recientemente publicado en el cual se emplea radiación de microondas sobre esta especie. Éstos coinciden en destacar, junto a otros autores, que los periodos de enfriamiento son sumamente importantes para evitar el sobrecalentamiento y la degradación térmica de las piezas sometidas al HMO, sobre todo en presencia de nudos o si el contenido de resina es alto [11]. Los pasos del 1 al 3 (cuadro 1), son los de mayor tiempo de exposición a la radiación (3 min), el cual se va acortando a medida que el proceso avanza, primero a 2 min (pasos del 4 al 6), luego a 1 min (paso 7) y finalmente 30 s (pasos 8 al 11). En los primeros pasos, cuando se pierde la mayor cantidad de agua, no es necesario introducir las probetas al desecador durante el período de descanso, debido a que su contenido de humedad es más alto que el del ambiente. Por el contrario, en los últimos cinco pasos las muestras fueron introducidas en un desecador debido a que pueden absorber humedad del ambiente durante el enfriamiento. El tiempo total del proceso alcanza 113 min, con una exposición al microondas de 18 min.

Cuadro 1. Esquema de secado en HMO para grupos de cinco probetas de pino caribe, el tiempo total del proceso fue de 113 min y tiempo total de irradiación fue de 18 min. Se muestra también el porcentaje de pérdida de humedad y tiempo acumulado de exposición al microondas.

Paso	Tiempo	Descripción	% Hp (CV)	Tiempo acumulado HMO (min)
1	3 min	Calentamiento	23 ± 6 (26)	3,0
	10 min	Descanso al aire		
2	3 min	Calentamiento	47 ± 8 (18)	6,0
	10 min	Descanso al aire		
3	3 min	Calentamiento	68 ± 9 (13)	9,0
	10 min	Descanso al aire		
4	2 min	Calentamiento	80 ± 11 (14)	11,0
	5 min	Descanso al aire		
5	2 min	Calentamiento	90 ± 13 (15)	13,0
	5 min	Descanso al aire		
6	2 min	Calentamiento	96 ± 15 (16)	15,0
	5 min	Descanso al aire		
7	1 min	Calentamiento	97 ± 16 (16)	16,0
	10 min	Descanso en desecador		
8	30 s	Calentamiento	97 ± 16 (16)	16,5
	10 min	Descanso en desecador		
9	30 s	Calentamiento	98 ± 16 (16)	17,0
	10 min	Descanso en desecador		
10	30 s	Calentamiento	98 ± 16 (16)	17,5
	10 min	Descanso en desecador		
11	30 s	Calentamiento	98 ± 16 (16)	18,0
	10 min	Descanso en desecador		

% Hp: porcentaje de pérdida de humedad. (CV): coeficiente de variabilidad o desviación estándar relativa.

Las temperaturas de las probetas durante el secado en HMO variaron entre 61 y 135 °C, aunque no se observó un patrón definido, encontrándose que en los pasos del 1 al 3 y del 4 al 6 la temperatura más alta se alcanzó cuando las probetas habían perdido la mayor cantidad de humedad, específicamente en los pasos 3 y 6. Es importante destacar, que estas medidas están afectadas de error debido a que no se tuvo la posibilidad de hacer la medición durante el pulso de radiación sino al finalizar éste después de abrir la puerta del horno. Se debe hacer la acotación de que durante los estudios preliminares, cuando se estaba ajustando el procedimiento, se observó en algunas muestras la aparición de puntos calientes, los cuales indican el inicio de la degradación térmica de la madera. Esto se debe a que las zonas de la pieza que tienen poco contenido de humedad y siguen siendo irradiadas, tienen altas probabilidades de convertirse en puntos de fuga térmica a pesar de que el factor de pérdida dieléctrica disminuya con la pérdida de agua [7,12]. En este caso, podrían estar ocurriendo mecanismos hasta ahora no estudiados, diferentes a la rotación dipolar y conducción iónica, a través de los cuales la energía radiante es convertida en calor [18], este fenómeno merece ser estudiado con detenimiento en trabajos posteriores.

La correlación entre los porcentajes de pérdida de humedad y el tiempo acumulado de exposición a la radiación de microondas se muestra en la figura 1, el comportamiento de la curva es consecuencia de las distintas formas en que las moléculas de agua se encuentran dentro de la madera. La mayor pérdida de humedad ocurre en los primeros 9 min, con un descenso sostenido, que en promedio es del 22 %, durante este período se extrae el agua libre la cual tiene una fuerza de cohesión baja, además de ser la que se encuentra en mayor cantidad en la madera verde [19]. Luego, aproximadamente a partir del minuto 11 la velocidad del secado comienza a disminuir y la curva deja de ser lineal, evidenciando un descenso en la velocidad de extracción de humedad debido a que se acerca al punto de saturación de la fibra (PSF, CH ~ 30 %), este tipo de agua es más difícil de retirar debido a que establece puentes de hidrógeno con los componentes de las paredes celulares, además se encuentra en menor proporción que el agua libre [19]. A partir del minuto 15, la velocidad disminuye aún más y la curva se aproxima a un 100 % de pérdida de humedad hasta alcanzar el peso constante a partir de los 17 min, esto ocurre porque una vez que es retirada toda el agua que está adherida a las paredes celulares, todavía la madera contiene una pequeña cantidad de humedad que es llamada agua de constitución [7]. Un comportamiento similar fue observado por otros autores, en diferentes especies y piezas de diversas dimensiones [1,13,20]. El comportamiento de la curva de pérdida de humedad se ajusta a una ecuación de tercer grado (figura 1), que arrojó un coeficiente de correlación igual a uno ($R^2 = 1$).

A partir de la ecuación de la curva (figura 1), se calculó el tiempo de exposición al microondas necesario para llevar las probetas a un CH aproximadamente del 12 %, el cual resultó ser de 12 min. Las probetas del grupo E2 fueron llevadas a esta condición empleando el procedimiento mostrado en el cuadro 1 hasta el paso 5 y luego fueron introducidas en el cuarto de acondicionamiento donde alcanzaron el EH en 2 días, a diferencias de las secadas en estufa hasta la condición seca al horno que lo alcanzaron en 4 días. Comprobándose que la curva describe adecuadamente el proceso y que tiene valor predictivo, estos resultados podrían constituir el punto de partida para la construcción de un modelo, que nos podría permitir calcular el tiempo de exposición necesario para alcanzar un contenido de humedad específico.

El cuadro 2 muestra las propiedades físicas de las probetas para las diferentes condiciones de humedad y secado, en ninguno de los casos se observan diferencias estadísticamente significativas entre los grupos control (C1 y 2) y experimental (E1 y 2). Los valores obtenidos coinciden, dentro del error, con los reportados por [14] para la misma especie, específicamente encontraron que $\rho_v = 1126 \pm 67 \text{ kg/m}^3$ ($\text{CH}_v = 134 \pm 33 \%$), $\rho_{sh} = 564 \pm 134 \text{ kg/m}^3$ y la contracción volumétrica de la condición verde a seca al horno fue de $11 \pm 3 \%$. Para la condición

seca al aire, estos autores reportaron $\rho = 600 \pm 137 \text{ kg/m}^3$ ($\text{CH} = 13 \pm 1 \%$), concordando con los obtenidos para la condición HEH en el presente trabajo. Los resultados indican que la propiedades estudiadas no son afectadas por la exposición a la radiación de microondas, observaciones que están de acuerdo con las realizadas por otros investigadores para otras especies [10,11,12,13].

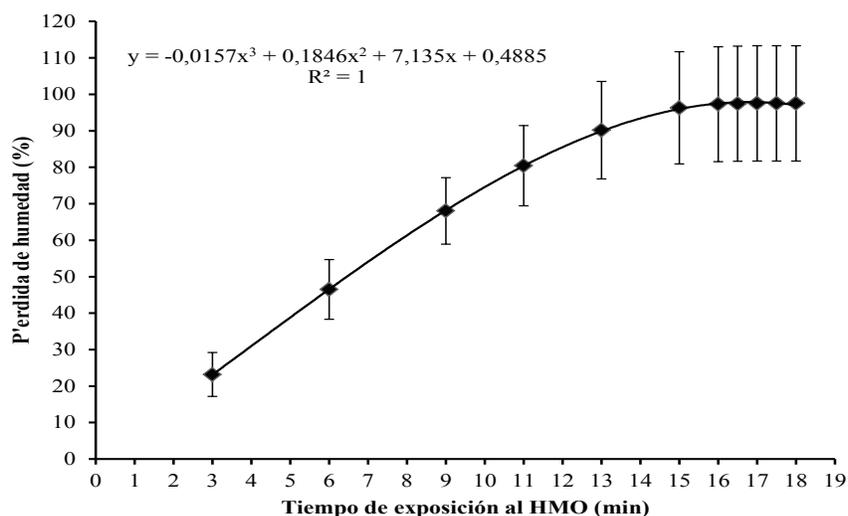


Figura 1. Porcentaje de pérdida de humedad versus tiempo de exposición al microondas, la curva se ajusta a un polinomio de tercer orden.

Cuadro 2. Comparación de las propiedades físicas de las probetas de los grupos control (C1 y 2) sometidas al secado convencional y experimental (E1 y 2) secadas en HMO (n = 15).

Propiedad	Control (CV)	Experimental (CV)
$\rho_v \text{ kg/m}^3$	1.041 ± 56 (5)	1.049 ± 74 (7)
$\rho_{sh} \text{ kg/m}^3$	544 ± 63 (12)	555 ± 63 (11)
$\rho_{eh} \text{ kg/m}^3$	573 ± 61 (11)	565 ± 51 (9)
CHv %	115 ± 18 (16)	107 ± 18 (17)
CHeh %	$10,7 \pm 0,7$ (7)	$11,3 \pm 0,8$ (7)
Vv m^3	$57,8 \pm 0,6 \times 10^{-6}$ (1)	$58 \pm 1 \times 10^{-6}$ (2)
Vsh m^3	$52 \pm 2 \times 10^{-6}$ (3)	$51 \pm 26 \times 10^{-6}$ (3)
Ctv %	10 ± 2 (20)	11 ± 3 (24)

(CV) = coeficiente de variabilidad o desviación estándar relativa, ρ_v = densidad verde, ρ_{sh} = densidad seca al horno, ρ_{eh} = densidad en el equilibrio higroscópico, CHv = contenido de humedad verde, CHeh = contenido de humedad en el equilibrio higroscópico, Ctv % = Contracción volumétrica de condición verde a seca al horno.

Los resultados de la evaluación de la compresión paralela al grano se muestran en la cuadro 3, comparando los grupos en las mismas condiciones de humedad. Para la condición seca al horno, el ELP de E1 (seca al HMO) resultó ser alrededor de 41 % mayor que el C1 (seca al horno), siendo esta diferencia estadísticamente muy significativa. El mismo comportamiento se observa para el MOE, siendo E1 cerca de 29 % mayor, mostrando una diferencia significativa; para la RM no se observó variación. Para los grupos en EH, no se observaron diferencias estadísticamente significativas, los valores para C2 y E2 son prácticamente iguales. Las diferencias observadas son las habituales de acuerdo al contenido de humedad, pero no se encontraron variaciones

atribuibles a los métodos de secado, como se ha reportado en la literatura [10,11]. No obstante, el grupo E1 tuvo un MOE y ELP significativamente mayores al grupo C1, esto pudo haber ocurrido por la presencia de probetas con una mayor proporción de madera tardía en el grupo E1, como consecuencia de su selección al azar, lo cual genera un incremento de la resistencia mecánica [11]. En general, en todos los parámetros se obtuvieron resultados un poco más altos que a los reportados por [21], que evaluaron la compresión paralela a la fibra de pino caribe en individuos de 21 años con un CH de 12 %. Estos resultados concuerdan con lo reportado por [11], quienes realizaron un ensayo mecánico de dureza a probetas de pino y obtuvieron mayor resistencia en las muestras secadas hasta en HMO a temperaturas de 100 y 60 °C hasta un 8 % de contenido de humedad, a pesar de ser propiedades mecánicas diferentes. Por el contrario, [22] obtuvieron resultados opuestos en la evaluación otra propiedad mecánica como el esfuerzo de tensión paralela. De acuerdo a lo discutido anteriormente, se hace necesario realizar nuevos trabajos ampliando el espectro de propiedades mecánicas que deben ser evaluadas.

Cuadro 3. Comparación de los resultados de la prueba de compresión paralela al grano de los grupos C1 (seca al horno) y E1 (seca al HMO), y en el EH (C2 y E2) (n = 15).

	ELP kg/m ² x 10 ⁶		MR kg/m ² x 10 ⁶		MOE kg/m ² x 10 ⁸	
C1	4,2 ± 0,9 (22)	p < 0,001	6 ± 1 (24)	ns	3,1 ± 0,6 (19)	p < 0,01
E1	6 ± 2 (29)		6 ± 2 (38)		4 ± 1 (26)	
C2	3 ± 0,3 (9)	ns	4,1 ± 0,5 (11)	ns	2,7 ± 0,3 (11)	ns
E2	3 ± 0,5 (16)		3,5 ± 0,64 (18)		2,3 ± 0,6 (26)	

(CV) = coeficiente de variabilidad o desviación estándar relativa, ELP = esfuerzo al límite proporcional, MR = módulo de ruptura, MOE = módulo de elasticidad.

En cuanto a las características anatómicas (cuadros 4 y 5), las diferencias observadas en DCI, DCt, ARd y GPt entre las muestras secadas al aire y las sometidas al proceso de secado al horno (C1) y en HMO (E1), no son significativas desde el punto de vista estadístico (Tukey, $\alpha = 0,01$). Para el secado al horno, hubo sólo dos probetas donde las diferencias en el grosor de paredes de traqueidas fueron significativas y una en la que el diámetro de los conductos transversales presentó diferencias significativas. Con respecto al secado en microondas, las únicas diferencias observadas fueron en relación al diámetro de conductos transversales en tres probetas. En general podría decirse que no hay ningún efecto significativo de los grupos C1 y E1 con respecto a las muestras secadas al aire, las diferencias observadas pueden atribuirse al proceso de selección de muestras para la medición más que a los procesos de secado, ya que el comportamiento mostrado es más bien aleatorio. Por ejemplo, en una de las probetas secada al HMO el grosor de paredes de traqueidas fue mayor en la probeta secada al aire y en el otro caso correspondió a la probeta secada en estufa (cuadros 4 y 5). Por otra parte, es importante destacar que en el secado en HMO se observó la aparición o acentuación de agrietamientos espiralados en las paredes de las traqueidas longitudinales, es la única diferencia que pudiera atribuirse al método de secado. Generalmente, aquellas muestras secadas al aire que no presentaban agrietamientos los desarrollaron tras el proceso de secado al HMO (figura 2.1) y en las que presentaban agrietamientos se manifestaron de manera más acentuada tras el secado en microondas (figura 2.2). En el caso del grupo C1, la aparición de agrietamientos espiralados es de reducida a nula. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos, esto no parece afectar las propiedades físicas y mecánicas estudiadas.

Cuadro 4. Características anatómicas de los grupos secados al aire y grupo C1 secado en estufa a convección forzada.

Carácter	Secado al aire	Grupo C1
	Probeta 1	
DCI (µm)	(95-) 148 ± 33 (-250) n = 25; CV = 22 %	(90-) 145 ± 34 (-230) n = 18; CV = 23 %
DCt (µm)	(40-) 44 ± 4 (-50) n = 25; CV = 9 %	(35-) 43 ± 4 (-50) n = 25; CV = 9,65 %
ARd (µm)	(180-) 257 ± 40 (-340) n = 25; CV = 15,47 %	(120-) 259 ± 51 (-340) n = 25; CV = 20 %
Gpt (µm)	(3,75-) 4,8 ± 0,9 (-7,5) n = 25; CV = 20 %	(3,125-) 4,5 ± 0,7 (-6,25) n = 25; CV = 16 %
	Probeta 2	
DCI (µm)	(80-) 126 ± 21 (-180) n = 25; CV = 17 %	(85-) 122 ± 17 (-160) n = 25; CV = 14 %
DCt (µm)	(30-) 37 ± 4 (-50) n = 25; CV = 10 %	(30-) 37 ± 5 (-45) n = 25; CV = 14 %
ARd (µm)	(210-) 275 ± 39 (-380) n = 25; CV = 14 %	(200-) 273 ± 48 (-390) n = 25; CV = 17 %
Gpt (µm)	(2,5-) 4,1 ± 0,7 (-5,625) n = 25; CV = 17 %	(3,75-) 4,9 ± 0,9 (-7,5) n = 25; CV = 20 %
	Probeta 3	
DCI (µm)	(90-) 127 ± 25 (-190) n = 20; CV = 20 %	(100-) 137 ± 23 (-200) n = 21; CV = 16 %
DCt (µm)	(40-) 46 ± 5 (-55) n = 25; CV = 9,6 %	(35-) 46 ± 5 (-60) n = 25; CV = 11 %
ARd (µm)	(210-) 258 ± 32 (-325) n = 25; CV = 12 %	(210-) 265 ± 35 (-360) n = 25; CV = 13 %
Gpt (µm)	(2,5-) 4,1 ± 1,2 (-6,25) n = 25; CV = 30 %	(1,875-) 4 ± 1 (-6,25) n = 25; CV = 26 %
	Probeta 4	
DCI (µm)	(85-) 115 ± 23 (-160) n = 22; CV = 19 %	(90-) 119 ± 16 (-160) n = 25; CV = 14 %
DCt (µm)	(30-) 36 ± 5 (-45) n = 25; CV = 13 %	(30-) 35 ± 5 (-45) n = 20; CV = 13 %
ARd (µm)	(210-) 274 ± 43 (-380) n = 25; CV = 16 %	(220-) 278 ± 41 (-350) n = 25; CV = 15 %
Gpt (µm)	(2,5-) 4,0 ± 0,8 (-5,625) n = 25; CV = 20 %	(3,125-) 3,9 ± 0,5 (-5) n = 25; CV = 12 %
	Probeta 5	
DCI (µm)	(95-) 137 ± 21 (-200) n = 25; CV = 15 %	(80-) 133 ± 22 (-190) n = 25; CV = 17 %
DCt (µm)	(40-) 49 ± 4 (-55) n = 25; CV = 8 %	(30-) 41 ± 4 (-50) n = 25; CV = 11 %
ARd (µm)	(175-) 259 ± 37 (-320) n = 25; CV = 14 %	(200-) 267 ± 44 (-360) n = 25; CV = 17 %
Gpt (µm)	(3,75-) 5,4 ± 0,9 (-6,875) n = 25; CV = 18 %	(3,125-) 4,5 ± 0,8 (-5,625) n = 25; CV = 17 %

DCI = Diámetro de conductos resiníferos longitudinales, DCt = Diámetro de conductos resiníferos transversales, ARd = Altura de radios, Gpt = Grosor de paredes de traqueidas.

Cuadro 5. Características anatómicas de los grupos secados al aire y grupo E1 secado en HMO.

Carácter	Secado al aire	Grupo E1
	Probeta 1	
DCI (µm)	(90-) 129 ± 18 (-160) n = 25; CV = 14 %	(100-) 134 ± 20 (-170) n = 13; CV = 15 %
DCt (µm)	(40-) 52 ± 6 (-70) n = 25; CV = 12 %	(45-) 56 ± 6 (-70) n = 25; CV = 11 %
ARd (µm)	(170-) 239 ± 36 (-310) n = 25; CV = 15 %	(160-) 248 ± 57 (-400) n = 25; CV = 22,88 %
Gpt (µm)	(3,75-) 6 ± 1 (-7,5) n = 25; CV = 17 %	(4,375-) 7 ± 1 (-8,125) n = 25; CV = 16 %
	Probeta 2	
DCI (µm)	(90-) 130 ± 25 (-170) n = 14; CV = 19 %	(80-) 130 ± 30 (-190) n = 22; CV = 23 %
DCt (µm)	(45-) 54 ± 5 (-65) n = 25; CV = 9,9 %	(40-) 52 ± 6 (-65) n = 25; CV = 11 %
ARd (µm)	(180-) 250 ± 42 (-350) n = 25; CV = 17 %	(200-) 254 ± 35 (-320) n = 25; CV = 14 %
Gpt (µm)	(5-) 6 ± 1 (-10) n = 25; CV = 20 %	(3,75-) 6 ± 1 (-8,125) n = 25; CV = 17 %
	Probeta 3	
DCI (µm)	(80-) 129 ± 28 (-190) n = 25; CV = 22 %	(90-) 133 ± 22 (-180) n = 25; CV = 16 %
DCt (µm)	(50-) 58 ± 7 (-75) n = 20; CV = 12 %	(40-) 49 ± 6 (-60) n = 22; CV = 13 %
ARd (µm)	(180-) 240 ± 38 (-310) n = 25; CV = 16 %	(210-) 268 ± 39 (-370) n = 25; CV = 15 %
Gpt (µm)	(3,125-) 5,7 ± 0,9 (-6,875) n = 25; CV = 16 %	(1,875-) 6 ± 2 (-9,375) n = 25; CV = 38 %
	Probeta 4	
DCI (µm)	---	---
DCt (µm)	(35-) 41 ± 5 (-50) n = 25; CV = 11,23 %	(45-) 55 ± 6 (-65) n = 18; CV = 10 %
ARd (µm)	(190-) 243 ± 53 (-390) n = 25; CV = 22 %	(180-) 252 ± 46 (-340) n = 25; CV = 18 %
Gpt (µm)	(5-) 6,1 ± 0,7 (-7,5) n = 25; CV = 12 %	(5-) 6 ± 1 (-8,125) n = 9; CV = 16 %
	Probeta 5	
DCI (µm)	---	---
DCt (µm)	(40-) 49 ± 8 (-65) n = 25; CV = 16 %	(35-) 46 ± 7 (-65) n = 19; CV = 16 %
ARd (µm)	(180-) 264 ± 49 (-360) n = 25; CV = 19 %	(200-) 263 ± 51 (-350) n = 25; CV = 19 %
Gpt (µm)	(3,125-) 5 ± 1 (-7,5) n = 25; CV = 20 %	(3,125-) 4,6 ± 0,8 (-6,25) n = 25; CV = 18 %

DCI = Diámetro de conductos resiníferos longitudinales, DCt = Diámetro de conductos resiníferos transversales, ARd = Altura de radios, Gpt = Grosor de paredes de traqueidas.

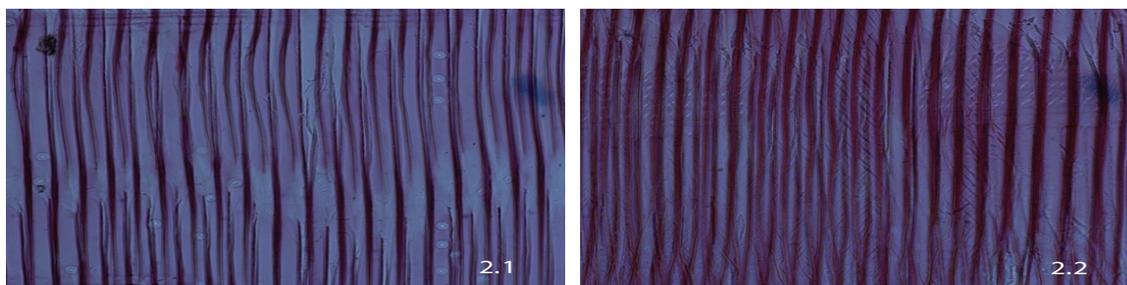


Figura 2.- Muestra secada al aire (2.1), libre de agrietamientos espiralados, y secada en microondas con agrietamientos espiralados (2.2).

En la cuadro 6 se muestra una comparación del consumo energético de los métodos de secado. El cálculo se realizó en base a 30 probetas, debido a que ésta es la capacidad máxima de la estufa utilizada en los ensayos, lo que corresponde aproximadamente a $1,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ de madera. La estimación se realizó a partir del consumo eléctrico nominal de cada instrumento, el tiempo invertido en el proceso y la cantidad de agua retirada. Se demostró que el proceso llevado a cabo en la estufa consume casi 12 veces más energía que en el HMO y se calculó que el tiempo total requerido disminuye de 27,0 h a 11,3 h. Se determinó que la cantidad de energía requerida para extraer un kg de agua de la madera de pino caribe utilizando el HMO es 92 % menor que la requerida en el proceso convencional. En este caso se obtuvo una eficiencia mayor a la del 80 %, reportada por [12] para otras especies de coníferas, o a la del 50 % encontrado por [8] para roble blanco (*Quercus alba*). Así mismo, el tiempo requerido para completar el proceso disminuye de 28,8 a 1,9 h/kg de agua retirada, lo que equivale a una disminución del 93 %, coincidiendo con varios autores que confirman una importante reducción en el tiempo de secado cuando se utiliza radiación de microondas [1,8,11,12,13].

Cuadro 6. Estimación del consumo de energía en el secado, desde la condición verde a seca al horno, empleando una estufa eléctrica a convección forzada ($103 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) y HMO, para un total de 30 probetas.

	Pv kg	Psh kg	P _{agua} kg	kW*	t (h)	kWh**	kWh/kg agua ext.
Estufa	1, 802	0,866	0,937	1,100	27,00	29,7	31,71
HMO	1,756	0,850	0,908	1,480	1,68	2,49	2,74

Pv = Peso verde, Psh = Peso seco al horno, P_{agua} = Peso del agua extraída, t = tiempo que permaneció encendida la estufa y el HMO, * = Consumo de energía del instrumento, ** = Consumo de energía por el tiempo de secado.

Conclusiones

a) Se estableció un esquema de secado para probetas de pino caribe utilizando un horno de microondas doméstico como fuente alternativa de energía, el cual mostró ser mucho más eficiente que el método convencional de secado en estufa, tanto desde el punto de vista de consumo de energía como del tiempo empleado en el proceso. Los resultados obtenidos indican que la exposición a la radiación de microondas, no causa alteraciones en sus propiedades físicas y en la compresión paralela al grano en la especie estudiada, y que las diferencias anatómicas observadas no tienen repercusión alguna.

b) Se hizo una caracterización parcial del proceso de secado en HMO construyendo una curva de pérdida de humedad vs. tiempo de exposición, la cual mostró tener valor predictivo, pudiendo ser éste el punto de partida para modelar el proceso de secado de pino caribe empleando radiación de microondas.

c) La investigación y posterior implementación de métodos de secado de madera como el desarrollado en este estudio, utilizando fuentes de energía alternativa y enmarcado dentro de los preceptos de la Química e Ingeniería Verdes, contribuiría a incrementar la sostenibilidad de la actividad forestal a través del ahorro de energía, tiempo de proceso y disminución de las emisiones de gases efecto invernadero, haciendo también un pequeño aporte tendiente a la mitigación del cambio climático.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento al Laboratorio de Anatomía de Maderas de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes, por la colaboración y aportes en la realización del trabajo, de la misma manera a las secciones de Ensayos y de Pulpa y Papel del LNPF-ULA. Agradecemos al Ing. Edder Pérez, Gerente General de Maderas del Orinoco, por su colaboración en el suministro de las muestras.

Referencias

- [1] P. Benítez-Díaz y I. Gutiérrez-Gotera. Determinación de contenido de humedad en astillas de *Pinus Caribaea* Var. *Hondurensis*, utilizando un horno doméstico de microondas. *Ingeniería*, 20(1):17-24, 2010. DOI: 10.15517/RING.V22I1.8396
- [2] ONU. Desarrollo Sostenible, Antecedentes. Asamblea General de las Naciones Unidas, Presidente del 65º Período de Sesiones, 2010. <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml> (1 de abril de 2020).
- [3] J. Fernández-Golfin y J. López. La bomba de calor en el secado de la madera aserrada. *Boletín de información técnica [de] AITIM*, 213:69-74, 2001. Recuperado de: http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_4165_12322.pdf
- [4] M. Payette, T. Work, P. Drouin y A. Koubaa. Efficacy of microwave irradiation for phytosanitation of wood packing materials. *Industrial Crops and Products*, 69:187-196, 2015. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.01.030
- [5] C. Salinas, R. Ananias y D. Vasco. Modelling of Radio-frequency Heating of Piles of *Pinus radiata* Wood. *BioResources*, 13(1):945-953, 2018. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_1_945_Salinas_Modelling_Radio_Frequency_Heating_Pinus/5779 (1 de abril de 2020).
- [6] V.G. Zuin y L.Z. Ramin. Green and Sustainable Separation of Natural Products from Agro-Industrial Waste: Challenges, Potentialities, and Perspectives on Emerging Approaches. *Topics in Current Chemistry (Z)*, 376(3):1-54, 2018. DOI: 10.1007/s41061-017-0182-z
- [7] A. Koubaa, P. Perré, R.M. Hutcheon y J. Lessard. Complex dielectric properties of the sapwood of aspen, white birch, yellow birch, and sugar maple. *Drying Technology*, 26(5):568-578, 2008. DOI: 10.1080/07373930801944762
- [8] M. Dubey, J. Janowiak, R. Mack, P. Elder y K. Hoover. Comparative study of radio-frequency and microwave heating for phytosanitary treatment of wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(4):491-500, 2015. DOI: 10.1007/s00107-016-1025-2.
- [9] L. Bandici, S. Coman y T. Leuca. The use of microwave field energy in the drying process of wooden sticks. *Proceeding of 14th International Conference on Engineering of Modern Electric System (EMES)*. Oradea, Romania, European Union, 2017. DOI: 10.1109/EMES.2017.7980390
- [10] L. Hansson y A. Antti. The effect of microwave drying on Norway spruce Woods strength: a comparison with conventional drying. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(1):41-50, 2003. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01102-0
- [11] L. Hansson y A. Antti. The effect of drying method and temperature level on the hardness of wood. *Journal of Materials Processing Technology*, 171(3):467-470, 2006. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2005.08.007

- [12] M. Leiker y M. Adamska. Energy efficiency and drying rates during vacuum microwave drying of wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 62(3):203-208, 2004. DOI: 10.1007/s00107-004-0479-9
- [13] G. Du, S. Wang, y Z. Cai. Microwave drying of wood strands. *Drying Technology*, 23 ç(12):2421-2436, 2005. DOI: 10.1080/07373930500340494.
- [14] E. Reyes, M. Molina, S. Valero, Y. Molina y J. Betancourt. Propiedades físicas de la madera de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*, resinado y no resinado de las plantaciones de Uverito (Monagas, Venezuela). *Revista Forestal Venezolana*, 56(1): 21-28,2012.
- [15] IAWA Committee. IAWA list of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal*, 25(1):1-702004. DOI: 10.1163/22941932-90000349
- [16] DEUSTCHE INDUSTRIE NORMEN (Normas DIN). Prüfung von Holz; Taschenbuch 31, 1988. Normen über Holz. Beuth-Verlag. 240 p.
- [17] ASTM. Designation: D 4442 – 92 (Reapproved 2003). Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. ASTM international, 2003. Recuperado de: <http://file.yizimg.com/424653/2013121013320823.pdf> (01/07/17)
- [18] S. Avramidis. Dielectric properties of four softwood species at low-level radio frequencies for optimized heating and drying. *Drying Technology*, 34(7):753-760, 2016. DOI: 10.1080/07373937.2015.1072719
- [19] Ö. Gezici-Koc, S. Erich, H. Huinink, L. van der Ven y O. Adan. Bound and free water distribution in wood during water uptake and drying as measured by 1D magnetic resonance imaging. *Cellulose*, 24(2):535-553, 2016. DOI: 10.1007/s10570-016-1173-x.
- [20] G. Du, S. Wang y Y. Zhang. Microwave Drying of Wood Strands. *Drying Technology*, 23(12):2421-2436, 2005. DOI: 10.1080/07373930500340494
- [21] E. Reyes, S. Valero, Y. Molina y J. Betancourt. Propiedades mecánicas de la madera de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* resinados y no resinados de las plantaciones de Uverito, estado Monagas, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 59(1):63-75, 2015.
- [22] A. Oloyede y P. Groombridge. The influence of microwave heating on the mechanical properties of Wood. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1-3):67-73, 2000. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00454-9

Aplicación de un índice de seguridad inherente para definir el nivel de riesgo químico: Caso de estudio en un laboratorio de investigación de un centro universitario

Application of an inherent safety index to define the level of chemical risk: Case study in a research laboratory of a university center

Joel Barrantes-Guzmán¹, Fernanda Barrantes-Rojas²,
Fiorella Camacho-Rojas³, Gloriana Obando-Santamaría⁴,
Nidia Quesada-García⁵, José Carlos Mora-Barrantes⁶

Fecha de recepción: 18 de febrero de 2021

Fecha de aprobación: 7 de junio de 2021

Barrantes-Guzmán, J; Barrantes-Rojas, F; Camacho-Rojas, F; Obando-Santamaría, G; Quesada-García, N; Mora-Barrantes, J.C. Aplicación de un índice de seguridad inherente para definir el nivel de riesgo químico: caso de estudio en un laboratorio de investigación de un centro universitario. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 76-92.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5627>

- 1 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: joel.barrantes.guzman@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5803-0232>
- 2 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo: maria.barrantes.rojas@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6247-6811>
- 3 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: fiorella.camacho.rojas@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1741-5520>
- 4 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: gloriana.obando.santamaria@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1279-5026>
- 5 Escuela de Química. Universidad Nacional. Sede Interuniversitaria, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: nidia.quesada.garcia@est.una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-9912-3355>
- 6 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>



Palabras clave

Seguridad inherente; riesgo químico; laboratorio; peligro químico; índice.

Resumen

La metodología de seguridad inherente (SI) permite evitar o eliminar los peligros tanto en industrias como en laboratorios experimentales mediante la evaluación del riesgo químico. Esta metodología contempla el adecuado funcionamiento tanto en condiciones óptimas de trabajo como extremas, incluyendo parámetros fisicoquímicos y toxicológicos para asegurar la fiabilidad del proceso químico y obtener como resultado un índice de seguridad inherente. En la presente investigación se evaluó un total de 22 prácticas de laboratorio con una cantidad de 76 reactivos químicos con el objetivo de definir el nivel de riesgo químico de un manual de laboratorio de investigación de un centro universitario, mediante la aplicación de un índice de riesgo de seguridad inherente, para la prevención de los riesgos hacia la salud de las personas y el medio ambiente. Se obtuvo como resultado un índice de seguridad inherente al producto químico experimental de 19 para la práctica “Determinación de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano por cromatografía de gases”, siendo este el valor máximo de riesgo químico presente en el manual de laboratorio. El valor obtenido se encuentra muy cercano al valor de seguridad inherente teórico (24), por lo que se considera una práctica riesgosa.

Keywords

Inherent safety; chemical risk; laboratory; chemical hazard; index.

Abstract

The inherent safety methodology (IS) makes an analysis to try to avoid or eliminate hazards both in industries and in experimental laboratories by the evaluation of chemical risk. This methodology contemplates the adequate operation either in optimal or extreme working conditions, including physicochemical and toxicological parameters to ensure the reliability of the chemical process and to obtain an inherent safety index as a result. In this investigation, a total of 22 laboratory practices were evaluated with 76 chemical reagents with the aim of defining the level of chemical risk of a research laboratory manual of a university center, by applying an inherent safety risk index for the prevention of risks to human health and the environment. The result was an inherent safety index for the experimental chemical of 19 for the practice “Determination of oxygen, nitrogen, carbon monoxide, carbon dioxide and methane by gas chromatography”, this being the maximum core of chemical risk in the laboratory. The value obtained is very close to the theoretical inherent safety value (24), thus it is considered a risky practice.

Introducción

A nivel local, Costa Rica presentaba una problemática vinculada a la carencia de normativas e instituciones relacionadas con la seguridad en industrias químicas y salud ocupacional; como respuesta ante esta necesidad surgen nuevos enfoques y organizaciones como: el Consejo de Seguridad Ocupacional (CSO) cuyo objetivo es establecer mejores condiciones laborales, la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) con su plan de gestión de riesgos, la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA) con su política nacional de seguridad química, Bomberos de Costa Rica con la aplicación de NFPA y colaboración en incidentes

de índole química, el Instituto Nacional de Seguros (INS), entre otras, que buscan disminuir la probabilidad de incidencia de riesgos químicos y con ello, aumentar la seguridad de los colaboradores [1], [2], [3], [4].

El peligro se relaciona al daño que puede originar un agente químico debido a sus propiedades fisicoquímicas y toxicológicas, según su clasificación: misceláneos, corrosivos, tóxicos, inflamables, explosivos, comburentes y radioactivos. Por otra parte, se habla de riesgo químico cuando un trabajador está expuesto a productos peligrosos y existe la posibilidad de sufrir un determinado daño debido a la frecuencia de esa exposición [5], [6], [7].

La evaluación del riesgo químico consta de una serie de etapas generales para su desarrollo. La primera etapa es la identificación de peligros, la cual permite obtener información referente a los agentes químicos presentes en el lugar de trabajo, así como las variables asociadas a estas sustancias: propiedades fisicoquímicas, toxicológicas y las condiciones de operación de las sustancias químicas. La segunda etapa corresponde a la estimación de riesgo durante los procesos de: almacenamiento, gases a presión y generación de residuos peligrosos. La tercera etapa incluye el estudio de los factores de riesgo que interfieren en la formación de: reacciones químicas peligrosas, incendios, explosiones, entre otras. La etapa final corresponde a la jerarquización de riesgos, cuyo objetivo es establecer un orden de prioridad para la evaluación de las situaciones de riesgo en función de las vías de exposición ante los agentes químicos (inhalación, absorción a través de la piel, contacto con la piel y ojos) [8].

La gestión del riesgo químico ha incentivado el desarrollo de diversas estrategias y metodologías, considerando diferentes variables, que permitan procesos más seguros de trabajo tanto para la salud de los usuarios como para el medio ambiente. Algunos ejemplos son el método INR, COSHH Essentials, Stoffenmanager, REGETOX, KjemRisk, entre otros [9].

Existe una metodología vinculada a la seguridad inherente (SI) en el diseño de procesos que considera las propiedades intrínsecas de las sustancias. Este método, busca erradicar y prevenir los peligros; sus principios básicos se basan en: intensificación, sustitución de recursos, atenuación, simplificación y limitación de efectos; los cuales a su vez se fundamentan en la evaluación de la sostenibilidad, desarrollando métodos orientados en actividades con menor cantidad de tóxicos o contaminantes [10], [11], [12], [13], [14].

La evaluación de la SI contempla el adecuado funcionamiento del sistema tanto en condiciones óptimas de trabajo como extremas, para asegurar la fiabilidad del proceso químico. En la aplicación de esta metodología se considera parámetros como: el control de inventario de sustancias químicas, disposición y compra de equipos de protección, instalaciones y variables operativas (presión, temperatura e interacción de las sustancias) [10], [15].

El índice de seguridad inherente se compone de dos variables o subíndices, el subíndice de riesgos para la salud y de peligros físicos/químicos y el subíndice de procesos [16]. Estos dos subíndices se dividen en más parámetros y se relacionan con: la toxicología (capacidad de absorción en el cuerpo humano), la naturaleza química de las sustancias (explosividad, reactividad e inflamabilidad) y la etapa productiva (temperatura, presión, rendimiento, conversión e inventario) [10], [17].

El objetivo general de la investigación fue definir el nivel de riesgo químico de un manual de laboratorio de investigación de un centro universitario, mediante la aplicación de un índice de riesgo de seguridad inherente, para la prevención de los riesgos hacia la salud de las personas y el medio ambiente.

Metodología

En el presente trabajo de investigación se evaluó el riesgo químico de los reactivos utilizados en las prácticas del manual de Laboratorio de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional de Costa (LAQAT-UNA). El manual consta de un total de 22 prácticas que describen métodos analíticos para la determinación de la concentración de contaminantes en el aire [18].

La categorización del riesgo químico se realizó mediante la metodología del Índice de Seguridad Inherente (I_{TI}), descrito por Heikkilä. Para el estudio se recolectaron parámetros de las sustancias químicas relacionados con sus propiedades fisicoquímicas y toxicológicas, tales como: entalpía de reacción, interacción química, inflamabilidad, explosividad, toxicidad y corrosividad. Los parámetros fisicoquímicos y toxicológicos de las sustancias analizadas fueron obtenidos principalmente de las hojas de seguridad química (Material Safety Data Sheet “MSDS”) consultadas en las siguientes bases de datos: Fisher, Carl Roth, Merck y Sigma Aldrich [19], [20], [21]. Estos parámetros fueron interpretados en el método como subíndices, permitiendo obtener el valor del riesgo total para cada reactivo químico, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{TI} = I_{CI} + I_{PI} \quad (\text{fórmula 1})$$

Donde:

I_{TI} : Índice de seguridad inherente total.

I_{CI} : Índice de seguridad inherente al producto químico.

I_{PI} : Índice de seguridad inherente al proceso.

El valor del riesgo para cada sustancia química se obtuvo por medio de la sumatoria de los índices descritos anteriormente, cada producto químico se evaluó en función a las características fisicoquímicas y toxicológicas de las sustancias, detalles de estructura y equipo utilizado en el laboratorio.

Índice de seguridad inherente al producto químico (I_{CI})

El índice de seguridad inherente al producto químico lo conforman los siguientes subíndices: calor de reacción ($I_{\Delta H}$), interacción química (I_{NT}), inflamabilidad (I_{FL}), explosividad (I_{EX}), exposición tóxica (I_{TOX}) y corrosividad (I_{COR}).

Para el cálculo del índice de calor de reacción ($I_{\Delta H}$) se utilizó las entalpías de formación estándar ($\Delta^{\circ}H_f$) recopiladas de las bases de datos del NIST [22] para las sustancias químicas evaluadas. El valor del $I_{\Delta H}$ se obtuvo de acuerdo con el cuadro 1.

Cuadro 1. Determinación del subíndice del calor de reacción ($I_{\Delta H}$).

Calor de reacción / masa de reacción total	Puntuación
Térmicamente neutro ≤ 200 J/g	0
Ligeramente exotérmico <600 J/g	1
Moderadamente exotérmico <1200 J/g	2
Fuertemente exotérmico <3000 J/g	3
Extremadamente exotérmico ≥ 3000 J/g	4

En lo que respecta al subíndice de interacción química (I_{INT}), este se determinó con la información obtenida de las hojas de seguridad (frases H, estabilidad y reactividad de las sustancias) y se asignaron los valores de acuerdo con el cuadro 2.

Cuadro 2. Determinación del subíndice de interacción química (I_{INT}).

Interacción química	Puntuación del I_{INT}	Interacción química	Puntuación del I_{INT}
Formación de calor	1 – 3	Formación de gases inflamables	2 – 3
Fuego	4	Explosión	4
Formación de gas inofensivo, no inflamable	1	Polimerización rápida	2 – 3
Formación de gases tóxicos	2 – 3	Químicos tóxicos solubles	1

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Para el subíndice de inflamabilidad (I_{FL}), se clasificaron los compuestos según el valor de los puntos de inflamación y ebullición obtenidos de las hojas de seguridad de los reactivos. El valor del subíndice se determinó de acuerdo con el cuadro 3.

Cuadro 3. Determinación del subíndice de inflamabilidad (I_{FL}).

Inflamabilidad	Puntuación del I_{FL}	Inflamabilidad	Puntuación del I_{FL}
No es inflamable	0	Fácilmente inflamable (punto de inflamación < 21°C)	3
Combustible (punto de inflamación > 55°C)	1	Muy inflamable (punto de inflamación < 0°C y punto de ebullición ≤ 35°C)	4
Inflamable (punto de inflamación ≤ 55°C)	2	N/A	N/A

Nota: N/A = No aplica. Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Para determinar el subíndice de explosividad (I_{EX}), se utilizaron los límites inferiores y superiores de explosividad de cada compuesto químico, estos límites se obtuvieron de las hojas de seguridad de las sustancias químicas. El valor del subíndice se obtuvo de acuerdo con el cuadro 4.

Cuadro 4. Determinación del subíndice de explosividad (I_{EX}).

Explosividad (UEL-LEL) vol %	Puntuación de I_{EX}	Explosividad (UEL-LEL) vol %	Puntuación de I_{EX}
No explosivo	0	45 – 70	3
0 – 20	1	70 – 100	4
20 – 45	2	N/A	N/A

Para la determinación del subíndice de exposición tóxica (I_{TOX}) de cada producto químico, se utilizaron los valores de límites umbrales (TLV) obtenidos de las hojas de seguridad de las sustancias y se compararon los criterios y resultados obtenidos a partir del cuadro 5.

Cuadro 5. Determinación del subíndice de exposición tóxica (I_{TOX}).

Límite tóxico (ppm)	Puntuación de I_{TOX}	Límite tóxico (ppm)	Puntuación de I_{TOX}
TLV > 10000	0	TLV ≤ 10	4
TLV ≤ 10000	1	TLV ≤ 1	5
TLV ≤ 1000	2	TLV ≤ 0.1	6
TLV ≤ 100	3	N/A	N/A

Nota: N/A = No aplica. Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Para la determinación del subíndice de corrosividad (I_{COR}) de los productos químicos, se tomó en consideración el material del recipiente en el cual se almacenan. Para el caso de los reactivos químicos almacenados en recipientes de vidrio o plástico, se asignó un valor del índice de cero, mientras que, las sustancias almacenadas en recipientes metálicos se les asignó un valor de 1.

El valor total del riesgo asociado a este índice se obtiene de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{CI} = I_{\Delta H} + I_{INT,max} + (I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX})_{max} + I_{COR,max} \quad (\text{fórmula 2})$$

Donde:

max: puntuación experimental máxima.

$I_{\Delta H}$: subíndice de calor de reacción.

$I_{INT,max}$: subíndice de interacción química.

$I_{FL,max}$: subíndice de inflamabilidad.

$I_{EX,max}$: subíndice de explosividad.

$I_{TOX,max}$: subíndice de toxicidad.

$I_{COR,max}$: subíndice de corrosividad.

El I_{CI} se obtiene de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{CI} = I_{\Delta H} + I_{INT,max} + (I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX})_{max} + I_{COR,max} \quad (\text{fórmula 3})$$

Donde:

max: puntuación teórica máxima

$I_{\Delta H}$: subíndice de calor de reacción.

$I_{INT,max}$: subíndice de interacción química igual 4.

$I_{EX,max}$: subíndice de explosividad igual 4.

$I_{TOX,max}$: subíndice de toxicidad igual a 6.

$I_{COR,max}$: subíndice de corrosividad igual a 2.

Índice de seguridad inherente al proceso (I_{PI})

El índice de seguridad inherente al producto proceso lo conforman los siguientes subíndices: inventario (I_I), temperatura del proceso (I_T), presión del proceso (I_P), equipo (I_{EQ}), estructura del proceso (I_{ST}).

Para la determinación de subíndice del inventario (I_i), se tomó en consideración la cantidad (t) de las sustancias almacenadas en el sitio de estudio. El método considera tanto el inventario en el área límite de la batería interna (ISBL) y el área límite de la batería externa (OSBL), es decir, la cantidad máxima de reactivo que se utiliza en un proceso unitario por hora. Para el caso del sitio de estudio, la máxima cantidad de reactivo utilizado no alcanza la tonelada, tanto para el ISBL como para el OSBL, por lo que se asignó un valor de cero para este subíndice (cuadro 6).

Cuadro 6. Determinación del subíndice del inventario (I_i).

Inventario		Puntuación de I_i	Inventario		Puntuación de I_i
ISBL	OSBL		ISBL	OSBL	
0-1 t	0-10 t	0	50-200 t	500-2000 t	3
1-10 t	10-100 t	1	200-500 t	2000-5000 t	4
10-50 t	100-500 t	2	500-1000 t	5000-10000 t	5

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

El subíndice de temperatura del proceso (I_T), está determinado por el máximo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) que puede alcanzar el área donde se desarrolla el proceso [10]. Para el sitio de estudio la temperatura máxima promedio es de 37°C [23]. El valor del subíndice se obtuvo como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7. Determinación del subíndice de temperatura del proceso (I_T).

Temperatura del proceso	Puntuación de I_T	Temperatura del proceso	Puntuación de I_T
$< 0^{\circ}\text{C}$	1	$150-300^{\circ}\text{C}$	2
$0-70^{\circ}\text{C}$	0	$300-600^{\circ}\text{C}$	3
$70-150^{\circ}\text{C}$	1	$> 600^{\circ}\text{C}$	4

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

El subíndice de presión del proceso (I_p), está determinado por la presión máxima (bar) que puede alcanzar el área de trabajo [10]. Para el sitio de estudio la presión máxima promedio es de 0,8884 bar [24]. El valor del subíndice se obtuvo como se muestra en el cuadro 8.

Cuadro 8. Determinación del subíndice de presión del proceso (I_p).

Presión del proceso	0.5-5 bar	0-0.5 o 5-25 bar	25-50 bar	50-200 bar	200-1000 bar
Puntuación I_p	0	1	2	3	4

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Para la determinación de los subíndices de seguridad referentes a la maquinaria (I_{EQ}), se consideró la peligrosidad asociada a las características del equipo utilizado en el ISBL y OSBL. La asignación de los valores del I_{EQ} se obtuvo según los cuadros 9 y 10.

Cuadro 9. Determinación del subíndice de equipo de seguridad del ISBL (I_{EQ}).

Equipos	Puntuación I_{EQ}
Equipos que manejan material no inflamable y tóxico.	0
Intercambiadores de calor, bombas, tambores, torres.	1
Enfriadores de aire, reactores, bombas del alto peligro.	2
Compresores, reactores con alto peligro.	3
Hornos, calentadores de fuego.	4

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Cuadro 10. Determinación del subíndice de equipo de seguridad del OSBL (I_{EQ}).

Equipos	Puntuación I_{EQ}
Equipos que manejan material no tóxico e inflamable.	0
Tanques a presión atmosférica para el almacenamiento de líquidos inflamables y bombas para líquidos inflamables y tóxicos.	1
Torres de enfriamiento, compresores, sistemas de purga, tanques de almacenamiento presurizados o refrigerados.	2
Antorchas, calentadores, hornos	3

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

Finalmente, para la determinación del subíndice de estructura del proceso (I_{ST}), se evaluó la seguridad de los métodos en función de los registros de accidentes ocurridos en el lugar de trabajo. En el presente estudio, se consideró un valor global de 0 para todas las prácticas analizadas, con base en el cuadro 11.

Cuadro 11. Subíndice de estructura de proceso seguro I_{ST}

Nivel de seguridad de la estructura del proceso	Recomendado (estándar, seguridad, etc.)	Prácticas de ingeniería adecuadas	Sin información o neutral	Probablemente inseguro	Menores accidentes documentados	Mayores accidentes documentados
Puntuación de I_{ST}	0	1	2	3	4	5

Fuente: A. Heikkilä, 1999.

El valor total del riesgo asociado a este índice se obtiene de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{PI} = I_I + I_{T,max} + I_{P,max} + I_{EQ,max} + I_{ST,max} \quad (\text{fórmula 4})$$

Donde:

max: puntuación experimental máxima.

I_i : subíndice de inventario.

$I_{T,max}$: subíndice de temperatura del proceso.

$I_{P,max}$: subíndice de presión del proceso.

$I_{EQ,max}$: subíndice de la maquinaria.

$I_{ST,max}$: subíndice de estructura del proceso.

Determinación del valor teórico máximo ($I_{TI\ TEO\ MAX}$) y valor teórico ($I_{TI\ TEO}$) del índice de seguridad inherente total

Para la determinación del valor teórico máximo del índice de seguridad inherente total se realizó la sumatoria de los valores teóricos máximos de los índices de seguridad inherente al producto químico ($I_{CI\ TEO\ MAX}$) y proceso ($I_{PI\ TEO\ MAX}$) según la fórmula 5.

$$I_{TI\ TEO\ MAX} = I_{CI\ TEO\ MAX} + I_{PI\ TEO\ MAX} \quad (\text{fórmula 5})$$

Donde:

max: puntuación experimental máxima.

$I_{CI\ TEO\ MAX}$: índice teórico de seguridad inherente al producto químico.

$I_{PI\ TEO\ MAX}$: índice teórico de seguridad inherente al proceso.

Para la determinación del valor teórico del índice de seguridad inherente total, según la fórmula 6, se realizó la sumatoria de los valores teóricos de los índices de seguridad inherente al producto químico ($I_{CI\ TEO}$) y no se contempló el índice al proceso ($I_{PI\ TEO}$) ya que no representa las condiciones de proceso reales a nivel de laboratorio.

$$I_{TI\ TEO} = I_{CI\ TEO} \quad (\text{fórmula 6})$$

Donde:

$I_{CI\ TEO}$: índice teórico de seguridad inherente al producto químico.

Resultados y discusión

Índice de seguridad inherente al producto químico (I_{CI})

En la presente investigación se evaluó mediante la metodología de seguridad inherente 22 prácticas de laboratorio con una cantidad de 76 reactivos químicos. En el cuadro 12 se presenta una muestra de los procedimientos analizados, a los cuales se les generó un código para nombrarlos con mayor facilidad, se indica además la cantidad total y ejemplos de reactivos utilizados por experimento.

Cuadro 12. Prácticas del manual de experimentos químicos del laboratorio LAQAT, Universidad Nacional.

Nombre de práctica	Código de la práctica	Cantidad de sustancias	Ejemplo de reactivos químicos analizados
Calibración de parámetros	CAP	0	-
Determinación de ácidos fuertes en aire)	DHA	3	Carbonato de sodio e isopropanol.
Determinación de óxidos de nitrógeno en la atmósfera	DNO	3	Cloruro de N-(1-naftil)-etilendiamina y ácido sulfanílico.
Determinación de amoníaco (Método del azul de indofenol)	DNH	12	Fenol y nitroprusiato de sodio.
Determinación de partículas totales en suspensión y PM10 método gravimétrico o de alto volumen	DPT	0	-
Determinación de hidrocarburos en la atmósfera	DHC	6	Diclorometano y ácido sulfúrico.
Muestreo y análisis de agua de lluvia	MAL	1	Ácido clorhídrico
Determinación de dióxido de azufre en la atmósfera	DSO	3	Ácido clorhídrico, sulfato de sodio.
Determinación de sulfuro de hidrógeno en la atmósfera	DHS	13	Diclorhidrato de N,N-dimetil-p-difenilendiamina y fostato de amonio.
Determinación de ozono en la atmósfera	DOA	12	Trióxido de arsénico y yodo molecular.
Análisis de aniones por HPLC	ACL	7	Ácido ftálico y cloruro de sodio.
Manejo del cromatógrafo de gases y su programa TURBOCHROM NAVIGATOR	GCT	2	Helio, hidrogeno
Muestreo y análisis de compuestos fenólicos en aire	AFA	6	Cloruro de amonio y fenol.
Determinación de mercapteno contenido en atmosférico	DMA	7	Ácido acético glacial y acetato de mercurio.
Determinación aldehídos en aire por medio de cartuchos de extracción en fase sólida	DAC	12	Formaldehido y carbón activado.
Muestreo de metano con bolsas TEDLAR	MMT	2	Helio e hidrogeno
Determinación de cloro libre contenido en la atmósfera	DCA	10	Cloroformo y ácido clorhídrico.
Determinación de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano por cromatografía de gases	ONM	6	Estándar de calibración de nitrógeno y estándar de calibración de dióxido de carbono.
Determinación de calor de combustión en muestras de combustibles fósiles líquidos	CFL	2	Ácido benzoico y oxígeno.
Determinación de agua en productos de petróleo por destilación	DAP	1	Xileno.
Determinación de nitrógeno en aceites lubricantes por el método de Kjeldahl	DNK	9	Ácido bórico y óxido de mercurio (II).
Determinación de azufre y cloruros en combustibles	ACC	10	Ácido benzoico y bromuro de sodio.
Total		127	

*Nota aclaratoria: La sumatoria representada en el cuadro se refiere a la cantidad de sustancias totales por práctica, el dato real de sustancias utilizadas es de 76, ya que se repiten reactivos químicos.

El cuadro 13 contiene la tabulación de los datos experimentales recopilados para la práctica denominada “Determinación de hidrocarburos en la atmósfera”.

Cuadro 13. Propiedades fisicoquímicas de las sustancias utilizadas en la “Determinación de hidrocarburos en la atmósfera” para obtener los subíndices de seguridad inherente.

Sustancias	Masa Molar (g/mol)	ΔH formación (J/g)	Interacción química	P. Inflamabilidad (°C)	Rango de inflamabilidad/ Explosividad (%)	TLV (ppm)	Material de almacenamiento
Ácido sulfúrico	98,079	-8271,82	H290 / H314	NA	NA	0,04985777	Vidrio
Metanol	32,04	-7440,7	H225 / H301 / H311 / H331 / H370	12	6,0-31	200	Vidrio
Ácido nítrico	63, 01	-2749,25	H290, H314, EUH071	83	NA	2,02	Vidrio

NA: No aplica.

A partir de los datos obtenidos en el cuadro anterior, se determinó para cada sustancia química de cada procedimiento el índice de seguridad inherente al producto químico (I_{CI}) mediante la suma de los subíndices: $I_{\Delta H}$, I_{INT} , I_{FL} , I_{EX} , I_{TOX} y I_{COR} . En el cuadro 14, se observa los valores asignados para cada subíndice.

Cuadro 14. Determinación del I_{TI} a partir de los subíndices inherentes en la “Determinación de hidrocarburos en la atmósfera”.

Sustancia	$I_{\Delta H}$	I_{INT}	I_{FL}	I_{EX}	I_{TOX}	I_{COR}	I_{CI} reactivo químico	I_{CI} Exp	I_{PI}	I_{TI}
Ácido sulfúrico	4	3	0	0	6	0	13	13	0	13
Metanol	4	2	3	2	2	0	13			
Ácido nítrico	3	2	1	0	4	0	10			

De acuerdo con los datos del cuadro anterior, el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el metanol (CH_3OH) tienen un valor de 13, para el I_{CIEXP} , este resultado (13) obedece al riesgo de seguridad inherente al producto químico de la práctica.

En el cuadro 15 se muestran los valores de la seguridad inherente total obtenido para cada práctica evaluada en el sitio de estudio.

Cuadro 15. Índice de seguridad inherente para cada práctica del manual de laboratorio LAQAT.

Código de la práctica	$I_{\Delta H \max}$	$I_{INT \max}$	$I_{FL \max}$	$I_{EX \max}$	$I_{TOX \max}$	$I_{COR \max}$	$I_{Cl \text{ Exp}}$	$I_{PI \text{ Exp}}$	I_{TI}
CAP	-	-	-	-	-	-	0	0	0
DHA	4	4	3	1	2	0	14	0	14
DNO	4	3	2	1	3	0	13	0	13
DNH	3	4	0	0	6	0	13	0	13
DPT	-	-	-	-	-	-	0	0	0
DHC	4	3	0	0	6	0	13	0	13
MAL	3	2	0	0	4	0	9	0	9
DSO	4	3	0	0	5	0	12	0	12
DHS	3	4	0	0	6	0	13	0	13
DOA	3	4	0	0	6	0	13	0	13
ACL	4	4	0	0	4	0	12	0	12
GCT	0	4	0	4	-	1	9	0	9
AFA	3	4	1	1	4	0	13	0	13
DMA	4	3	2	1	3	0	13	0	13
DAC	4	4	4	3	3	0	18	0	18
MMT	0	4	0	4	0	1	9	0	9
DCA	4	2	3	1	4	0	14	0	14
ONM	4	4	4	1	5	1	19	0	19
CFL	-	3	1	0	4	0	8	0	8
DAP	-	3	2	1	3	0	9	0	9
DNK	4	3	0	0	6	0	13	0	13
ACC	4	4	0	0	4	0	12	0	12

En el caso específico de las prácticas CAP y DPT estas no presentan valores asociados a los parámetros estudiados debido a que el procedimiento no emplea sustancias químicas. En la figura 1 se muestra una comparación de las prácticas CFL y ONM con menor (8) y mayor (19) $I_{TI \text{ EXP}}$ respectivamente; donde se denota que la práctica ONM se aproxima más al $I_{TI \text{ TEO}}$.

El $I_{TI \text{ EXP}}$ mínimo obtenido corresponde a la práctica CFL con un valor de 8, esto obedece principalmente a que el ácido benzoico utilizado presenta valores de inflamabilidad, explosividad y corrosión cercanos al límite mínimo establecido (0-1). En el caso de la interacción química la puntuación asignada (3) se asocia a la emisión de gases tóxicos e inflamables producto del proceso de descomposición de la sustancia. Para esta práctica el mayor de los subíndices corresponde al I_{TOX} (4), lo cual se debe al valor de TLV de reactivos químicos con un valor de 1,0011 ppm.

Por el contrario, el valor máximo de I_{TI} corresponde a la práctica ONM con un $I_{TI \text{ EXP}}$ igual a 19, este valor obedece primordialmente al uso del metano, cuya entalpía de formación es extremadamente exotérmica (-4663,3 J/g), se identifica como un gas considerablemente inflamable (-188°C), lo que propicia la generación de fuego, así como la formación de mezclas inflamables y explosivas con agentes oxidantes debido a su rango de explosividad (5-15%). El metano presenta además un valor de TLV de 1 ppm, que corresponde a un valor de subíndice

de toxicidad de 5; por lo que forma parte del 42,11% de las sustancias con mayor subíndice de entalpía de formación, 3,95% de reactivos inflamables y 14,47% para la toxicidad respectiva. Cabe destacar que esta sustancia por su capacidad corrosiva se almacena comúnmente en cilindros de acero inoxidable, por lo que su valor de I_{COR} es 1.

En la figura 2 se representa el porcentaje de reactivos químicos con las puntuaciones más altas correspondientes a cada subíndice de I_{CI} , lo que evidencia principalmente la utilización de sustancias con mayor entalpía de formación capaces de liberar mucha energía (42,11%) tal es el caso de sustancias como carbonato de sodio (Na_2CO_3), isopropanol (CH_3H_8O), ácido acético glacial (CH_3COOH), ácido sulfúrico (H_2SO_4), entre otros. Mientras que, es menor la utilización de sustancias con bajos puntos de inflamabilidad y amplios rangos de explosividad (3,95%) como acetaldehído (CH_3CHO) y etileno (C_2H_4).

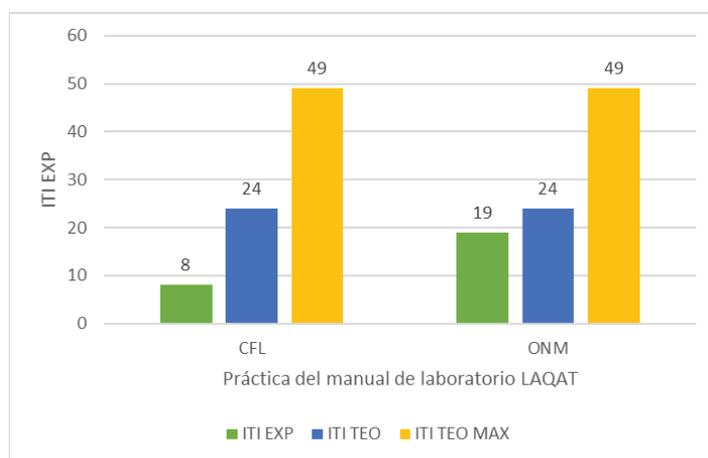


Figura 1. Comparación las prácticas del manual de laboratorio LAQAT con menor y mayor $I_{TI EXP}$.

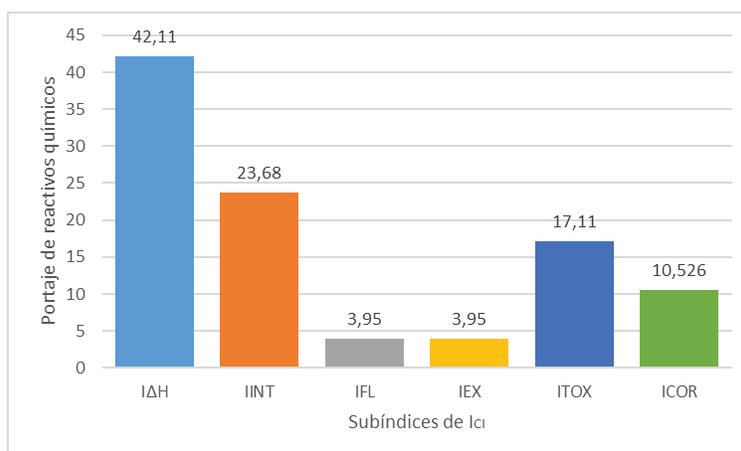


Figura 2. Porcentaje de reactivos químicas con las puntuaciones más altas correspondientes a cada subíndice I_{CI} .

En las figuras 3 y 4 se comparan los valores experimentales de cada práctica ($I_{TI EXP}$) con el valor $I_{TI TEO MAX}$ (49) (gráfico 3) y con el valor $I_{TI TEO}$ (24) (gráfico 4). De acuerdo con el gráfico 3 la práctica más cercana al valor $I_{TI TEO MAX}$ (49) es la práctica ONM con un valor de $I_{TI EXP}$ de 19. Por su parte, la práctica con el valor más lejano al $I_{TI TEO MAX}$ (49) es CFL con un valor de 8. No

obstante la mayoría de las prácticas presentan valores lejanos al $I_{TI\ TEO\ MAX}$ con un promedio de 11,32 esto obedece a que el $I_{TI\ TEO\ MAX}$ contempla valores asociados a una escala industrial, por lo tanto, se descarta ya que no representa las condiciones reales del laboratorio.

Con respecto al gráfico 4 la práctica más cercana al valor $I_{TI\ TEO}$ (24) es la práctica ONM con un valor de $I_{TI\ EXP}$ de 19 y un porcentaje de error de 20,83%, esto representa una cercanía al $I_{TI\ TEO}$ (24), por lo que ONM es la práctica que posee mayor riesgo químico, lo anterior obedece a las características fisicoquímicas y toxicológicas de las sustancias utilizadas en el desarrollo de la práctica. Por otra parte, la práctica con el valor más lejano al $I_{TI\ TEO}$ (24) es CFL con un valor de 8, cuyo porcentaje de error es 66,67%, esto representa una lejanía al $I_{TI\ TEO}$ (24), por lo que CFL es la práctica que posee menor riesgo químico, contrariamente a OMN la naturaleza química de las sustancias empleadas no representan la puntuación máxima en los índices estudiados disminuyendo el riesgo químico de la práctica.

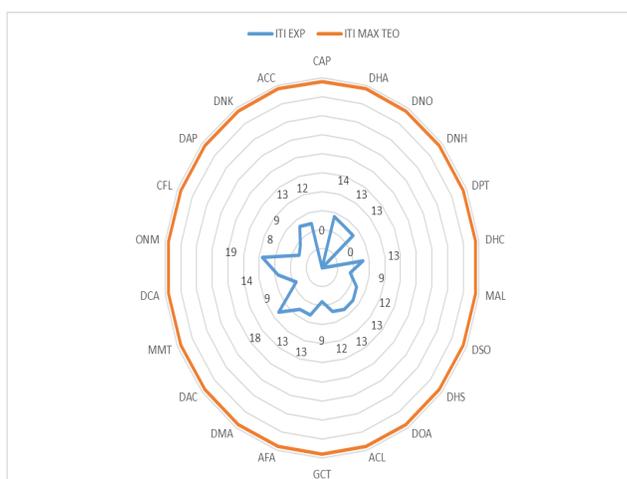


Figura 3. Comparación de los valores experimentales de los índices de seguridad inherente total ($I_{TI\ EXP}$) de las prácticas con respecto al valor del índice de seguridad inherente total teórico máximo ($I_{TI\ TEO\ MAX}$).

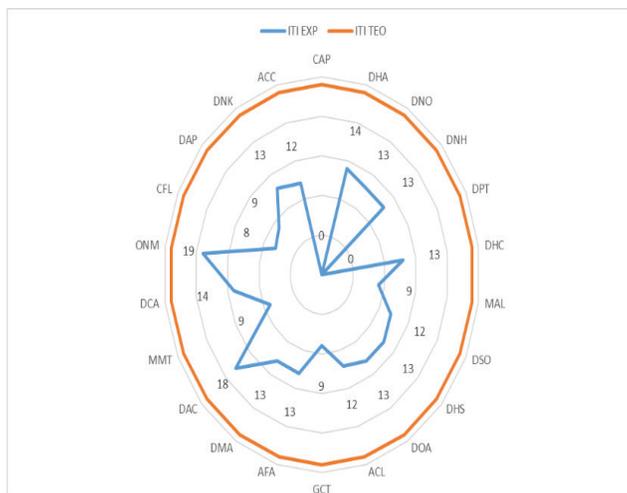


Figura 4. Comparación de los valores experimentales de los índices de seguridad inherente total ($I_{TI\ EXP}$) de las prácticas con respecto al valor del índice de seguridad inherente total teórico máximo ($I_{TI\ TEO}$).

En el cuadro 16 se muestran los valores de $I_{TI\ EXP}$, $I_{TI\ TEO}$ y sus porcentajes de error para la determinación del nivel de riesgo experimental del laboratorio LAQAT obteniendo un $I_{TI\ EXP}$ total de 249, que en comparación con el $I_{TI\ TEO}$ total (528) presenta un porcentaje de error de 52,84%. Las prácticas de “Determinación de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano por cromatografía de gases” y “Determinación de aldehídos en aire por medio de cartuchos de extracción en fase sólida” representan las metodologías con mayor nivel de riesgo de todo el laboratorio. Dichas prácticas tienen un $I_{CI\ EXP}$ con valores de 19 y 18 respectivamente (valores de $I_{CI\ EXP}$ más altos), lo cual obedece a los valores obtenidos en los subíndices de interacción química, entalpía de formación, inflamabilidad y toxicidad de cada una de las prácticas.

Cuadro 16. Determinación del nivel de riesgo químico del laboratorio LAQAT.

Código de la práctica	$I_{TI\ EXP}$	$I_{TI\ TEO}$	Porcentaje de error (%)
CAP	0	24	100,00
DHA	14	24	41,67
DNO	13	24	45,83
DNH	13	24	45,83
DPT	0	24	100,00
DHC	13	24	45,83
MAL	9	24	62,50
DSO	12	24	50,00
DHS	13	24	45,83
DOA	13	24	45,83
ACL	12	24	50,00
GCT	9	24	62,50
AFA	13	24	45,83
DMA	13	24	45,83
DAC	18	24	25,00
MMT	9	24	62,50
DCA	14	24	41,67
ONM	19	24	20,83
CFL	8	24	66,67
DAP	9	24	62,50
DNK	13	24	45,83
ACC	12	24	50,00
Total	249	528	52,84

Conclusiones

Este estudio se realizó para evaluar el riesgo químico del manual de laboratorio LAQAT por medio de la metodología de Seguridad Inherente. Al aplicar este método, se analizaron 22 procedimientos con un total 76 sustancias químicas, siendo la práctica de “Determinación de oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano por cromatografía de

gases” la que representó el mayor riesgo químico con un índice de seguridad inherente total de 19. Por otra parte, se determinó un valor de riesgo químico de 249 con un porcentaje de error de 52,84% para el laboratorio LAQAT, por lo que se concluyó que no representa un riesgo significativo.

De los reactivos evaluados el 42,11% correspondieron a sustancias extremadamente exotérmicas, 23,68% fueron considerados explosivos, 10,53% presentaron la capacidad de liberar gases tóxicos e inflamables, formar calor o rápida de polimerización; 3,95% se clasificaron como compuestos muy inflamables con el rango máximo de explosividad, 17,11% se identificaron con el menor límite de toxicidad ($TLV \leq 0.1$) y 10,53% requirieron un material especial para su almacenamiento.

Finalmente, la metodología de Seguridad Inherente aplicada no se considera una técnica adecuada para evaluar el riesgo químico del laboratorio LAQAT, ya que contempla parámetros a escala industrial que no representan las condiciones reales del laboratorio. Además, no toma en cuenta las vías de exposición a las sustancias químicas, no establece escalas para categorizar el grado del riesgo químico en: bajo, medio y alto; así como tampoco proporciona información referente a las acciones correctivas a ejecutar.

Referencias

- [1] S. Hidalgo y P. Rivera, “Programa de comunicación del riesgo químico y sus alternativas de solución”, tesis MSc, Instituto Tecnológico de Costa Rica, pp. 10, 2010.
- [2] Dirección de gestión de calidad ambiental, Política Nacional de Seguridad Química. [Online]. Disponible en: <http://www.digeqa.go.cr/areas/politica-nacional-de-seguridad-quimica>
- [3] Consejo de Salud Ocupacional, (2020, 07 de octubre), Acerca del Consejo de Salud Ocupacional, [Online]. Disponible en: https://www.cso.go.cr/quienes_somos/index.aspx#HERMES_TABS_1_1
- [4] Comisión Nacional de Emergencias, “Informe nacional de monitoreo 2019”, San José, Costa Rica, 2019.
- [5] M. Tamés, “Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con los agentes químicos presentes en los lugares de trabajo”. Editorial Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, pp. 12-34, 2013.
- [6] E. Medina, “Programa de gestión de los elementos de protección personal para el laboratorio químico: Reactivos SAS,” Ph.D.dissertation. Especialización en riesgos laborales, salud y seguridad en el trabajo, Corporación universitaria minuto de Dios, Bogotá, pp. no indica, 2018.
- [7] Y. Lu, “Integrating chemical Hazard assessment into the design of inherently safer processes,” Ph.D, Texas A&M University, Department of Chemical Engineering, USA, 2011.
- [8] J. Aguilar, *et al.* “Riesgo Químico: sistemática para la evaluación higiénica”. Editorial Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, pp. 11-50, 2010.
- [9] R. Jiménez, *et al.* “Herramientas para la gestión del riesgo químico. Métodos de evaluación cualitativa y modelos de estimación de la exposición”. Editorial Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT): Madrid, pp. 40-53, 2017.
- [10] A. Heikkilä, “Inherent safety in process plant design, Technical research center of Finland”, pp. 1–132, 1999.
- [11] J. Seral y E. Gadea, “Seguridad inherente: rutas de síntesis y diseño de procesos,” Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, pp. 1-6, 2016.
- [12] S. Park, S. Xu, W. Rogers, H. Pasman y M. El-Halwagi, “Incorporating inherent safety during the conceptual process design stage: A literature review,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 63, nº 104040, pp. 2-28, 2019.
- [13] D. Mansfield, L. Pouler y T. Kletz, “Improving Inherent Safety,” *Offshore Technology Report*, vol. 96, nº 521, pp. 1-61, 1996.
- [14] X. Gao, A. A. Abdul Raman, H. F. Hizaddin, and M. M. Bello, “Systematic review on the implementation methodologies of inherent safety in chemical process,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 65, no. March, p. 104092, 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104092.

- [15] E. Rodríguez, M. Campinas, J. L. Acero, and M. J. Rosa, "Investigating PPCP Removal from Wastewater by Powdered Activated Carbon/Ultrafiltration," *Water, Air, Soil Pollut.*, vol. 227, no. 6, 2016, doi: 10.1007/s11270-016-2870-7.
- [16] M. Hassim and M. Hurme, "Inherent occupational health assessment during process research and development stage". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, pp. 127-138, Jun. 2009.
- [17] P. Narváez, "Selección de la ruta química", en *Diseño conceptual de procesos químicos Metodología con aplicaciones en esterificación*. Editorial Universidad Nacional de Colombia: Bogotá, pp. No indica, 2014.
- [18] *Manual de laboratorio de análisis LAQAT*, 2016. Universidad Nacional de Costa Rica.
- [19] Carl Roth - International, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.carlroth.com/com/en/>. [Accesado: Octubre, 6, 2020].
- [20] Fisher Scientific, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.fishersci.com/us/en/catalog/search/sdshome.html>. [Accesado: Octubre, 6, 2020]
- [21] Merck, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.merckmillipore.com/GT/es?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>. [Accesado: octubre 6, 2020]
- [22] NIST, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.nist.gov> [Accesado: octubre 16, 2020]
- [23] Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/reporte-pronostico-regional> [Accesado: octubre 20, 2020]
- [24] Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, 2020. [Online]. Disponible en: http://meteoro.ucr.ac.cr/estaciones/ingenieria/hist_patmos.html [Accesado: octubre 20, 2020]

Contenido de metales pesados en varios ríos de Costa Rica

Heavy metals content in several rivers in Costa Rica

Noemi Quirós-Bustos¹, Diana Robles-Chaves²,
Andrey Caballero-Chavarría³, Guillermo Calvo-Brenes⁴

Fecha de recepción: 8 de marzo de 2021
Fecha de aprobación: 21 de julio de 2021

Quirós-Bustos, N; Robles-Chaves, D; Caballero-Chavarría, A; Calvo-Brenes, G. Contenido de metales pesados en varios ríos de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 93-104.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5532>



- 1 Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: nquiros@tec.ac.cr
- 2 Centro Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: drobles@tec.ac.cr
- 3 Centro Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: acaballero@tec.ac.cr
- 4 Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Autor para correspondencia. Correo electrónico: gcalvo@tec.ac.cr

Palabras claves

Metales pesados; calidad de ríos; contaminación.

Resumen

Costa Rica posee una riqueza hídrica importante; sin embargo, varios ríos presentan niveles de contaminación altos. Un tipo importante de contaminantes son los metales pesados (MP) que pueden tener un efecto adverso en la salud en personas, animales y plantas. Su no biodegradabilidad y su bioacumulación ocasionan efectos tóxicos duraderos. Existe poca información sobre MP en los ríos de Costa Rica; por eso el propósito de esta investigación fue evaluar la calidad de varios ríos ubicados en distintas regiones del país. Se seleccionaron 26 sitios de muestreo y se evaluó el contenido de 7 MP entre el 2017 al 2018. Los MP evaluados fueron: plomo, cromo total, cadmio, mercurio, cobre, arsénico y níquel. Se encontró presencia de cada uno de los metales. En general, no se observaron diferencias de MP entre la época seca y la lluviosa. La presencia de arsénico solo se encontró en los ríos Tempisque y Toro; en el primer caso los valores usualmente sobrepasaron la normativa nacional. Algunos MP evaluados mostraron concentraciones cercanas al límite máximo recomendado. El caso del mercurio sobresalió entre los datos pues estuvo presente en el 61,5% de los sitios muestreados y en la mayoría de ellos sobrepasaron la normativa nacional.

Keywords

Heavy metals; river quality; contamination.

Abstract

Costa Rica has many water resources; however, several of the rivers are highly contaminated. An important pollutant type is the heavy metals (HM) that can have an adverse health effect in people, animals, and plants as well. Its non-biodegradability and its bioaccumulation cause long-lasting toxic effects. There is little information on HM in the rivers of Costa Rica; Therefore, the purpose of this research was to evaluate the quality of several rivers located in different regions of the country. Twenty-six sampling sites were selected, and 7 HM content were evaluated between 2017 and 2018. The metals selected were lead, total chromium, cadmium, mercury, copper, arsenic and nickel. The different HM were found in several sites. In general, there were no differences between HM concentrations during the dry season and the rainy season. The presence of arsenic was only found in the Tempisque and Toro rivers; in the first case, there values usually exceeded national regulations. Other HM were found in some evaluated sites and usually with concentrations close to the maximum recommended limit. The case of mercury stands out among the data since it is found in 61,5% of the sampled sites and, for the most part, they exceed national regulations.

Introducción

Costa Rica posee una riqueza hídrica importante; sin embargo, varios de los ríos presentan niveles de contaminación altos [1]. Parte de esta contaminación proviene de descargas directas a los ríos de aguas residuales domésticas e industriales; mientras que otras corresponden a contaminación difusa cuyos principales contaminantes tienen su origen en actividades agrícolas y la contaminación atmosférica. Diferentes contaminantes que se mantienen suspendidos en el aire en forma de partículas, eventualmente se depositan en el suelo y estos, a su vez junto

con los contaminantes existentes en los suelos, pueden ser acarreados hasta los ríos y zonas costeras a través de procesos erosivos y las escorrentías que se producen durante períodos de precipitaciones pluviales [2] [3].

Un tipo importante de contaminantes son los metales pesados (MP) pues tienen un impacto adverso en la salud, tanto en personas como en animales y en plantas, cuando su concentración sobrepasa ciertos límites en el agua, el aire, en el suelo o en sedimentos [4][5][6][7]. Estos metales se encuentran en la naturaleza y forman parte de los procesos metabólicos en la flora y fauna [8]. Sin embargo, cuando estos sobrepasan ciertos niveles, se convierten en contaminantes de alta peligrosidad [3][4][6][7]. Los MP provienen tanto de fuentes naturales como antropogénicas; las naturales incluyen a las rocas, minerales e incluso la actividad volcánica; mientras que las fuentes antropogénicas incluyen las actividades agrícolas, industriales, domésticas, la minería, la generación de energía y el transporte [9].

Dentro de los seres vivos, estos metales se pueden bioacumular ya que el organismo, en ocasiones, no tiene mecanismos para reducir su concentración a un ritmo adecuado. Dentro del organismo estos pueden alcanzar concentraciones más elevadas que las que se encuentran en el medio ambiente o en los alimentos [7][8]. Además, son no-biodegradables y la contaminación puede durar entre cientos y miles de años. Tal es el caso del cadmio (Cd) que puede tardar en reducir su concentración a la mitad en un suelo contaminado en un periodo de tiempo que puede tardar entre 15 a 1100 años, aproximadamente. En el caso del cobre (Cu) es de 310 a 1500 años y para el Pb, se estima en 740 a 5900 años; proceso que dependerá del tipo de suelo, así como los procesos fisicoquímicos que ocurran [10].

El hecho de que los MP sean bioacumulables y que su biodegradabilidad sea prácticamente nula, ocasionan efectos tóxicos duraderos [7][9]. Niveles altos de metales en plantas causan un efecto fitotóxico que se puede manifestar en una disminución de su crecimiento, alteran el consumo o retención de agua dentro de la planta, afectan la permeabilidad de las raíces, inhiben los procesos fotosintéticos, la respiración o la afectación de la actividad enzimática [5].

La contaminación por MP en el ambiente se da por 5 posibles vías: retención en suelos, absorción en plantas (cadena trófica), en material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) donde usualmente se encuentra retenido y el cual, a su vez, está en suspensión en el aire; retención en polvos urbanos, así como la movilización en aguas superficiales y subterráneas [6].

En humanos, la exposición a estos elementos está relacionada con problemas de salud como retrasos en el desarrollo, varios tipos de cáncer, daños en el riñón, e incluso, con casos de muerte [7][11]. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que la exposición de las personas a zonas urbanas contaminadas produce la muerte de 7 millones de personas por año [6]. Su efecto dañino en el caso del ser humano proviene por la ingesta de agua contaminada con MP, pero también en flora y fauna contaminada con metales y que sean parte de la cadena alimentaria del hombre [6][12].

Los MP también se encuentran en el aire, usualmente retenidos en las partículas que se encuentran en suspensión (PM_{10} y $PM_{2.5}$); así como en el suelo, el polvo sobre las carreteras, las plantas, el agua de los ríos y sus sedimentos [6]. En polvo urbano, su origen se debe principalmente a cenizas de la combustión de los vehículos (74%), así como residuos urbanos (9%) y otros [6][13]. Cambios en las condiciones fisicoquímicas en los ríos pueden ocasionar que los MP acumulados y retenidos en los sedimentos en los ríos y en el mar, sean liberados en el agua y en las zonas costeras [4][14]. Cualitativamente se ha observado que usos del suelo como el agrícola, urbano o minero, muestran distintos niveles de contaminación por MP [11].

Los estudios recientes de metales pesados en sedimentos en Costa Rica muestran una tendencia al aumento en su concentración y esto se ha relacionado con un uso del suelo mal planificado y sin controles claros, además del aumento de las aguas residuales sin tratamiento que se ha venido dando hasta el presente [14][15]. Los suelos son contaminados de metales por el uso de pesticidas, fertilizantes, compost, estiércol, lodos y aguas residuales [4][10][16]. La figura 1 muestra que la agricultura intensiva y las actividades mineras se encuentran entre las principales fuentes de contaminación del suelo [11][17].

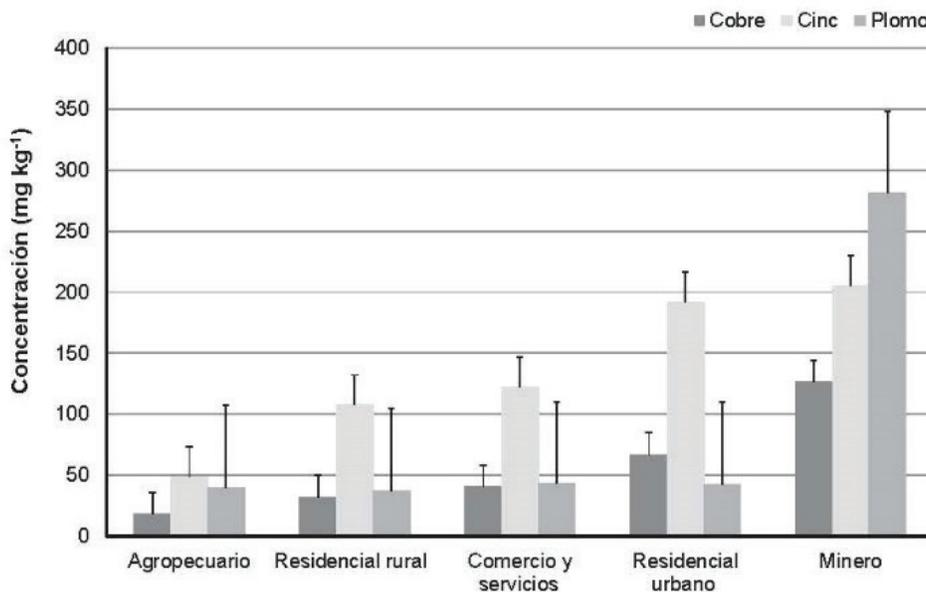


Figura 1. Variación del contenido de Cobre, Zinc y Plomo en suelo según su uso.

Fuente: [11].

Costa Rica ha logrado avances importantes en el suministro de agua potable en diferentes partes del país; sin embargo, ha habido un rezago importante en alcantarillado sanitario y tratamiento de aguas residuales. En el 2014 la cobertura de alcantarillado sanitario con tratamiento era de un 4%; en el 2016 fue de 8,2% y para el 2017 se reportó un 14,4% [18]. Se estima que un 84% de aguas residuales domésticas y un 55% de aguas industriales son vertidas a los ríos sin recibir algún tratamiento [19]. Estos datos muestran que hay un porcentaje muy alto de aguas residuales domésticas que no son tratadas y son vertidas en los ríos, generando niveles altos de contaminación en los ríos y las zonas costeras. En Costa Rica se llevó a cabo un estudio en ríos y aguas subterráneas y se encontró que 25 de las 34 cuencas estudiadas muestra presencia de metales pesados. Sin embargo, dicho estudio no detalla el contenido, el tipo de metal encontrado, el lugar ni el tipo de fuente de agua [20]. Por otra parte, estudios realizados en sedimentos del río Pirro mostraron contenidos altos en MP retenidos en los sedimentos, los cuales pueden ser liberados en el río por procesos de sorción-desorción al darse cambios en las condiciones fisicoquímicas del cauce [4][14].

Existen pocos estudios sobre la contaminación por metales pesados en los ríos costarricenses; es por esta razón que el propósito de esta investigación fue evaluar la calidad de varios ríos de Costa Rica con relación a su contenido en MP.

Materiales y métodos

Selección de los puntos de muestreo

Se seleccionaron 26 puntos de muestreo que muestran entre sí variabilidad en los distintos usos del suelo. También se consideró la geomorfología, el drenaje, la pendiente y accesibilidad, variables que influyen en la calidad de las aguas [1][3].

Las zonas de estudio seleccionadas están ubicadas en algunas de las siguientes regiones: San Carlos, Guanacaste, el Atlántico, el Gran Área Metropolitana y Osa. Los sitios de muestreo se ubicaron en los ríos Arenal, Caño Negro, Temquisque, Pital, Toro, Tigre, Rincón, Sierpe, Torres, Poás, Segundo, Pacuare, Penshurt y Birris.

Recolección de muestras de agua

La frecuencia de los muestreos se llevó a cabo cada dos meses en un período de 14 meses para todos los puntos de muestreo, y con ello poder evaluar el contenido de metales pesados en las épocas lluviosas y seca. Los muestreos se efectuaron entre los meses de Setiembre del 2017 hasta Noviembre del 2018.

La recolección de las muestras se efectuó en recipientes plásticos y transportados en hieleras siguiendo las recomendaciones establecidas en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” [21].

Las muestras fueron recolectadas y transportadas en frío al laboratorio. La preservación de las muestras se efectuó utilizando HNO_3 hasta $\text{pH} < 2$.

Análisis de metales pesados en ríos

Los contenidos de metales evaluados en las muestras de agua de ríos fueron los siguientes: plomo (Pb), cromo total (Cr), cadmio (Cd), mercurio (Hg), cobre (Cu), arsénico (As) y níquel (Ni).

La metodología de medición y digestión fue la establecida en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” [21].

Las concentraciones de As, Cd, Cr, Cu, Pb y Ni fueron determinados por espectrometría de absorción atómica de horno de grafito, utilizando el equipo Perkin Elmer modelo AAnalyst 800 con el apoyo de un horno de grafito para la determinación de concentraciones a nivel de trazas. La determinación de Hg también se realizó con este equipo, pero por la técnica de generación de hidruros y el hierro por la técnica de llama. Previo a la lectura de las muestras, se realizó una digestión con HNO_3 y HCl en plantilla de calentamiento.

Verificación de metodologías

La validación de la metodología se llevó a cabo a través del análisis de materiales de referencia certificados. Se evaluaron los parámetros de desempeño de veracidad, precisión, límite de detección y cuantificación, rango de trabajo y linealidad. Además, se utilizaron los criterios de aceptación establecidos en la norma de referencia.

Graficación de resultados

La graficación de los resultados se llevó a cabo utilizando el programa Statistical Package for Social Science (SPSS versión 25) y el tipo de gráfico fue el de cajas-bigotes.

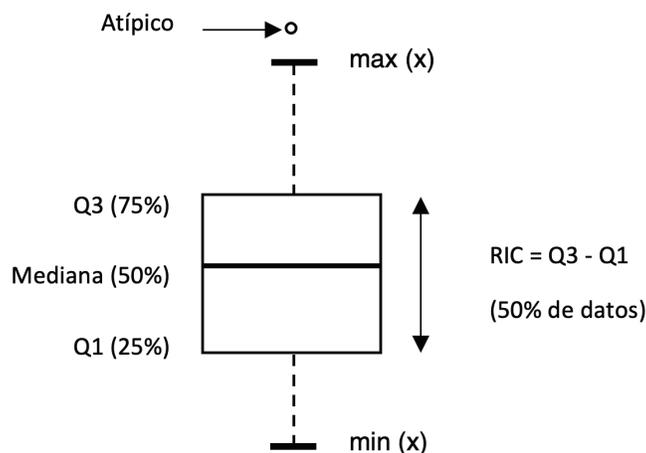


Figura 2. Representación del diagrama de caja-bigotes y sus componentes principales.

El diagrama incluye la mediana, los percentiles 25 y 75 por lo que el rango de valores dentro de la caja representa la distribución del 50% de los valores. Los bigotes corresponden al valor más pequeño y el valor más grande reportados, siempre y cuando no se trate de valores atípicos. El uso del símbolo “o” y “*” son utilizados para mostrar valores atípicos y que, por lo tanto, son valores influyentes y que el programa SPSS los grafica por aparte. Los valores atípicos generados en SPSS muestran unos números los cuales no se deben confundir con la concentración en ese dato, sino que se refiere a la identificación numérica del grupo de datos para facilitar su ubicación en la base de datos.

Resultados y discusión

Contenido de plomo (Pb)

El reglamento para la evaluación y clasificación de cuerpos de agua superficiales [22] establece como límite máximo permisible en contenido de Pb para Clase 1 en agua de ríos un valor de 0,03 mg/L. Por otra parte, el reglamento para la calidad del agua potable [23] establece un valor máximo de 0,01 mg de Pb/L. Cuatro sitios de muestreo presentaron una sola lectura con contenido de Pb (15,4%), mientras que el resto de las 7 mediciones efectuadas en distintos momentos en cada sitio fue de 0,000 mg/L. Tres de ellas fueron por debajo del límite máximo para ríos Clase 1 y la de Sierpe Palmatica sobrepasó dicho valor. Cada una de estas 4 lecturas fueron superiores al límite estipulado para agua potable (0,01 mg de Pb/L). Las concentraciones de Pb fueron de 0,012, 0,012, 0,026 y 0,044 mg de Pb/L para Birris 1, Birris 2, Caño Negro y Sierpe-Palmatica, respectivamente (figura 3). En el resto de los puntos muestreados no se encontró presencia de Pb.

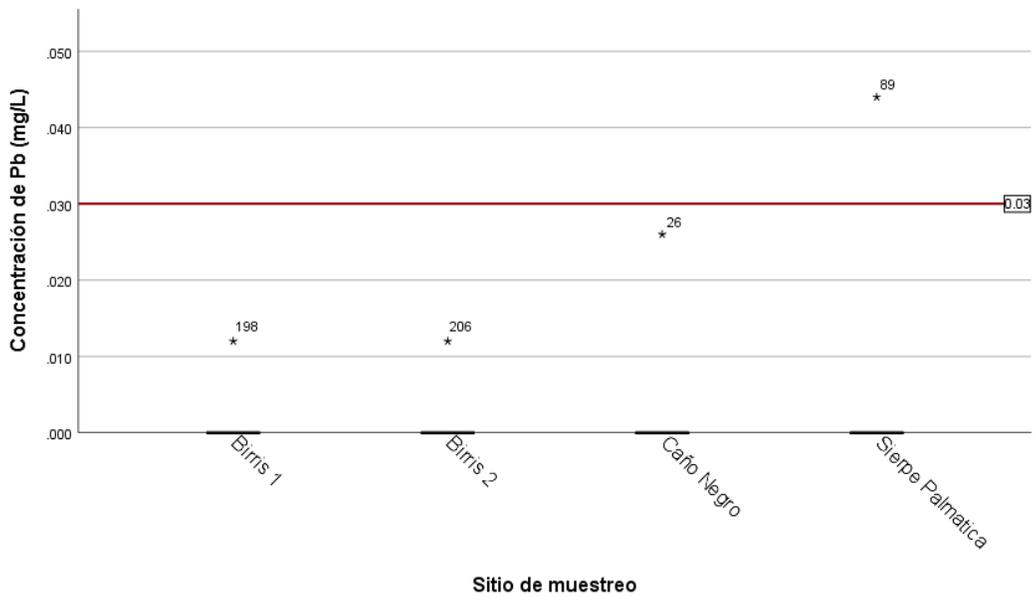


Figura 3. Puntos de muestreo con presencia de Pb en sus ríos.

Contenido de Cr

En el caso del Cr, ambos reglamentos establecen un máximo permisible de 0,05 mg/L. En general, se observó que el contenido de Cr en agua de ríos es inferior a ese valor. Sin embargo, 22 puntos de los 26 evaluados (84,6%), mostraron la presencia de Cr en sus aguas (figura 4). En los casos en que el gráfico sólo mostró un dato, como lo es el Birris 2 o el Arenal 2, esto se debe a que durante el período de análisis en ese sitio, sólo una vez se encontró la presencia de Cr.

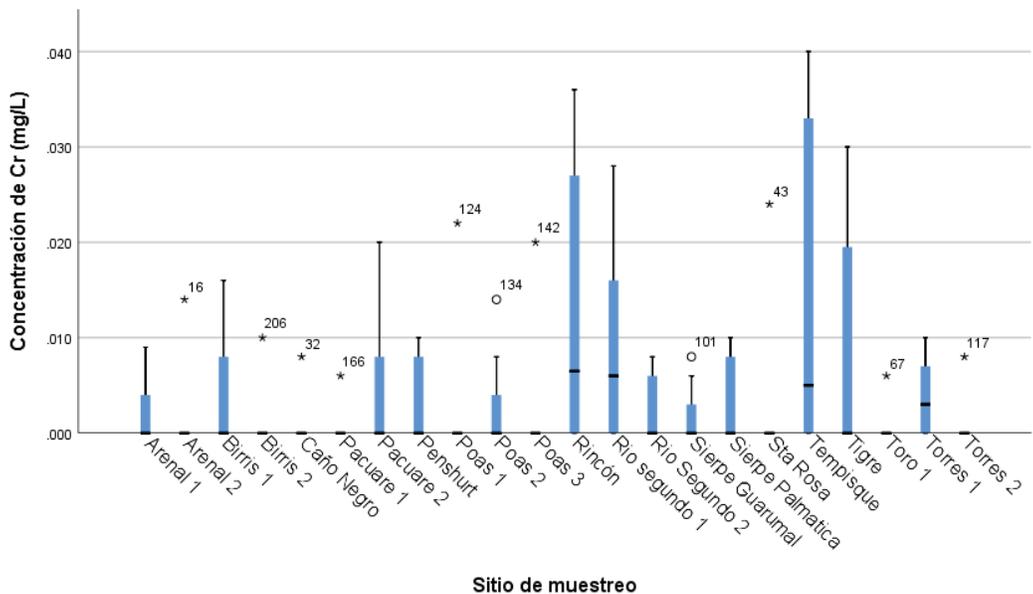


Figura 4. Puntos de muestreo con presencia de Cr en sus ríos.

Contenido de Cu

El reglamento para la evaluación y clasificación de cuerpos de agua superficiales [22] establece como límite máximo permisible en contenido de Cu en Clase 1 para el agua en ríos un valor de 0,5 mg/L. Por otra parte, el reglamento para la calidad del agua potable [23] establece un valor máximo de 2,0 mg de Cu/L. Veinte y cuatro puntos de los 26 muestreados (92,3%) tienen presencia de Cu. Todos ellos poseen concentraciones de Cu por debajo de ambas normativas (figura 5).

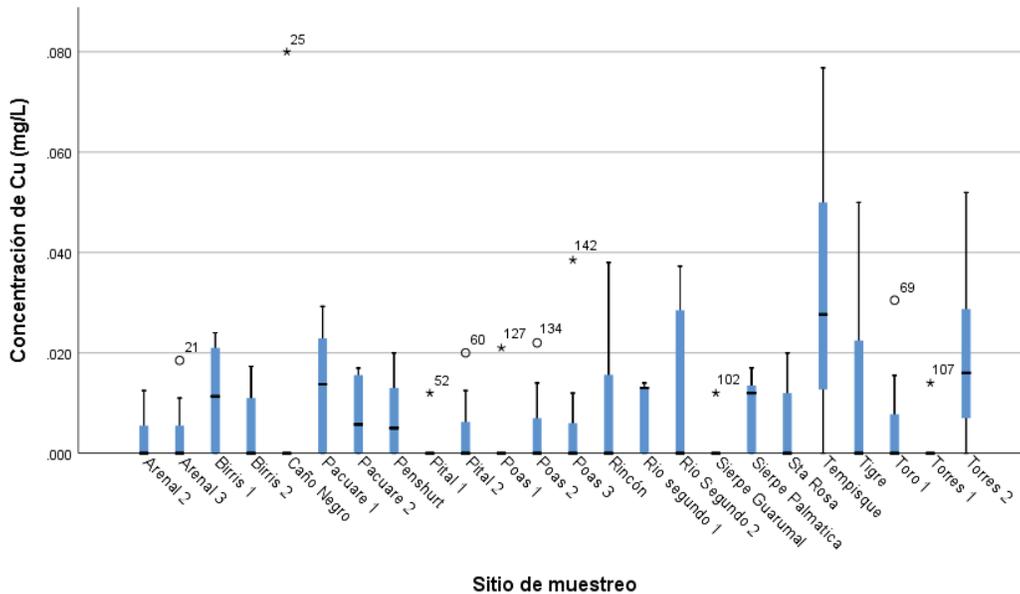


Figura 5. Puntos de muestreo con presencia de Cu en sus ríos.

Contenido de As

Tanto el reglamento para ríos [22], así como el de agua potable [23] establecen como límite máximo permisible en contenido de As un valor de 0,01 mg/L. De todos los puntos muestreados, sólo el del río Tempisque presenta contenido de As en sus aguas (figura 6) en la mayoría de los períodos muestreados. Además, varias de las muestras analizadas en dicho lugar están por encima del valor máximo permisible. Por su parte, el río Toro (Toro 1) presentó presencia de As (0,0070 mg As/L) en sólo uno de los períodos muestreados, mientras que en los restantes 7 períodos no se reportó la presencia de As.

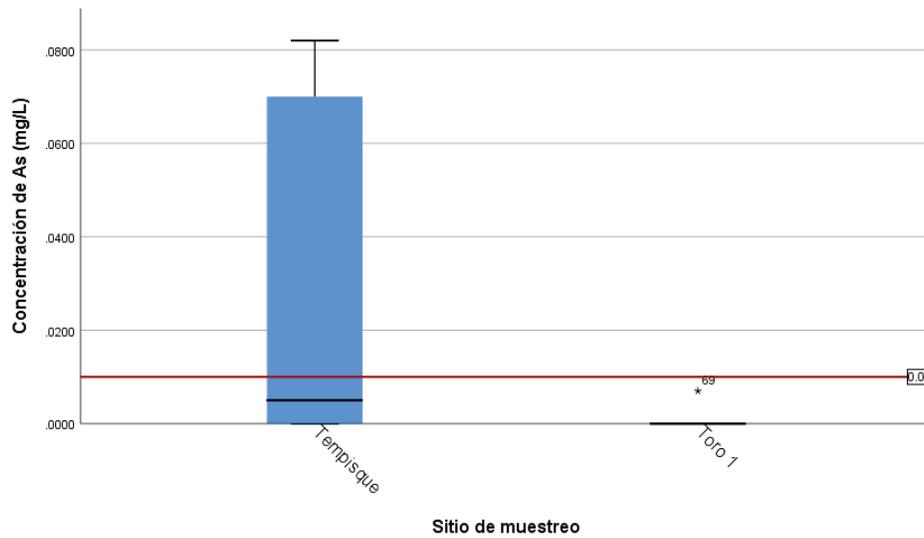


Figura 6. Puntos de muestreo con presencia de As en sus ríos.

Contenido de Cd

Ninguno de los puntos muestreados contenía Cd en sus aguas durante el período de los muestreos, excepto en Rincón donde se encontró presencia de Cd en una concentración de 0,0033 mg/L en uno de los muestreos. Los restantes 7 muestreos en este lugar no se detectó presencia de este elemento.

Contenido de Ni

El reglamento de aguas superficiales establece como límite máximo permisible en contenido de Ni en Clase 1 para el agua en ríos un valor de 0,05 mg/L. Por otra parte, el reglamento para agua potable establece un valor máximo de 0,02 mg de Ni/L. Quince puntos de muestreo de los 26 seleccionados (57,7%) mostraron contenido de Ni en sus aguas (figura 7). Todos los puntos presentaron valores inferiores al 0,05 mg/L. Sin embargo, El Tempisque y el Birris 1 presentaron algunos datos superiores al 0,02 mg/L establecidos por la norma para agua potable.

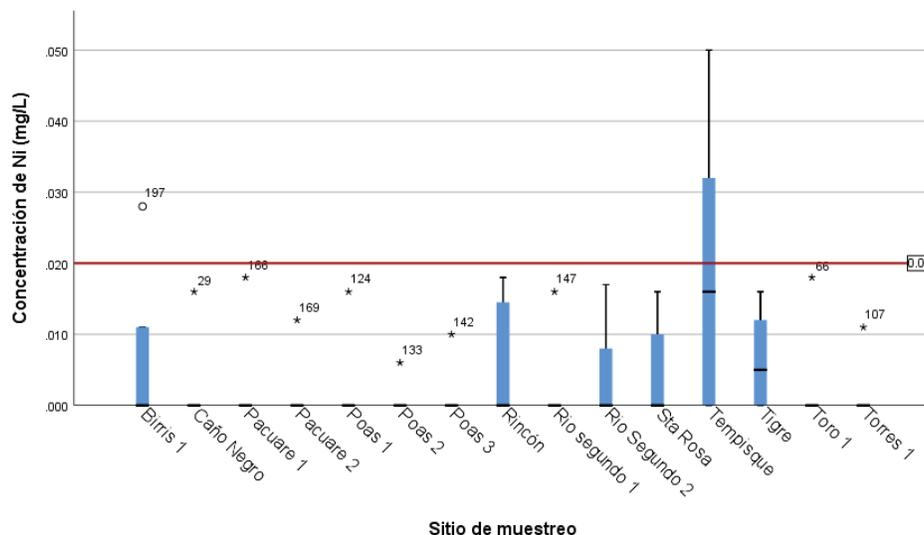


Figura 7. Puntos de muestreo con presencia de Ni en sus ríos.

Contenido de Hg

Tanto el reglamento para ríos, así como el agua potable establecen como límite máximo permisible en contenido de Hg un valor de 0,001 mg/L. Dieciséis sitios de los 26 seleccionados (61,5%), presentaron presencia de Hg en varias de las ocasiones del período de muestreo y varios de estos valores de Hg están por encima del valor máximo permisible de ambas normas (figura 8).

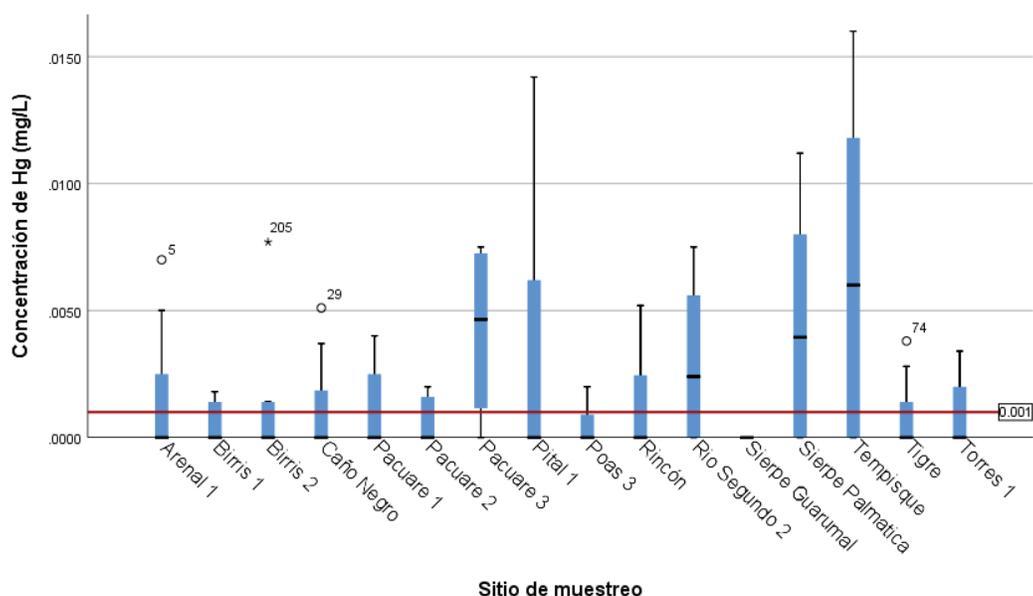


Figura 8. Puntos de muestreo con presencia de Hg en sus ríos.

Conclusiones y recomendaciones

En general, se observó una variación en la concentración de los MP en los puntos de muestreo cuyos valores pueden oscilar desde 0 mg/L hasta valores altos. No se observó una variación pequeña con valores relativamente constantes a lo largo del tiempo para los puntos de muestreo con cada metal. Por el contrario, se reportan importantes variaciones en los resultados obtenidos para cada metal en cada sitio entre un muestreo y otro.

Se observó la influencia del período seco y el lluvioso en el contenido de MP en cada sitio de muestro y se concluyó que no hay diferencia en presencia y concentraciones de los MP analizados.

El Cd solamente se detectó en Rincón y en uno solo de los muestreos. En el resto de los sitios, este MP estuvo ausente. El Cu se detectó en un 92,3% de los sitios muestreados, aunque el mismo está por debajo de los límites de permisibilidad para ríos clasificados como Clase 1. El Cr se detectó en 84,6% de los sitios del estudio y aunque está por debajo de los límites de permisibilidad, los datos están relativamente cerca de este límite. El Pb se detectó en un 15,4% de los casos y solo uno de los 8 muestreos en el sitio dio lectura positiva. Sus valores están cerca de los límites de permisibilidad y solo un caso sobrepasó este límite. Igual comportamiento exhibe el Ni que se encontró en el 57,7% de los sitios muestreados. El As sólo se encontró en el Tempisque y en la mayoría de los muestreos efectuados en ese sitio mostraron valores que sobrepasaron la norma para Clase 1. También se reportó un muestreo con presencia de Pb en el sitio Toro 1. Por último, llama la atención del Hg que se encontró en 61,5% de los sitios evaluados y varios de las concentraciones eran superiores a la normativa nacional para Clase 1.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Costa Rica por su apoyo financiero y administrativo. Además, el Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) y el Centro de Investigación y Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), por su apoyo al proyecto.

Referencias

- [1] G. Calvo-Brenes, "Índices e indicadores sobre la calidad del agua," 1th ed. Cartago, Costa Rica, ET, 2018. ISBN 978-9977-66-454-5.
- [2] G. Calvo-Brenes, "Modelo de predicción de la calidad del agua en ríos basado en índices e indicadores del recurso hídrico y el entorno socio ambiental". Tesis para optar al grado de doctor. DOCINADE. UNED, UNA, ITCR, San José, Costa Rica, 2013.
- [3] G. Calvo-Brenes, "Ríos: fundamentos sobre su calidad y la relación con el entorno socioambiental," 1th ed. Cartago, Costa Rica, ET, 2015. ISBN 978-9977-66-341-8.
- [4] M. Peris, "Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón", Tesis para optar al grado de doctor. Universitat de Valencia. Valencia, España, 2006.
- [5] Chang, A.C., Granato, C. and Page, A.L. 1992. A methodology for establishing phytotoxicity criteria for chromium, copper, nickel and zinc in agricultural land application of municipal sewage sludges. *Journal of environmental quality*. 21(4), 1992.
- [6] S. Ramos, "Los metales pesados: importancia de los estudios en áreas urbanas y periurbanas" en Primer congreso internacional de geología médica, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 2016. Disponible en http://www.sgm.gob.mx/pdfs/26_10%20Los%20Metales%20Pesados%20Est_areas%20urbanas%20y%20periurbanas.pdf
- [7] Y. Hong, W. Liao, Z. Yan, Y. Vai, C. Feng, Z. Xu and D. Xu, "Progress in the research of the toxicity effect mechanisms of heavy metals on freshwater organisms and their water quality criteria in China", *Journal of Chemistry*, vol. 2020, no. 9010349, pp. 1-12, May 2020.
- [8] S. Stankovic, P. Kalaba and A. Stankovic, "Biota as toxic metal indicators", *Environ Chem Lett*, vol. 12, pp. 63-84, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0430-6>.
- [9] U. Nkwnonwo, P.O. Odika and N.I. Onyla, "A review on the health implications of heavy metals in food chain in Nigeria", *The Scientific World Journal*, vol. 2020, no. 6594109, pp. 1-11, Abril 2020.
- [10] H. Juárez, "Contaminación del río Rimac por metales pesados y efecto en la agricultura en el Cono Este de Lima Metropolitana", Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú, 2012, Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/riorimac/indice.pdf>
- [11] J. Alcalá, C. Avila, J. Rodríguez y A. Hernández, "Metales pesados como indicador de impacto de un sistema ecológico fragmentado por usos de suelo," *FCA UNCUIYO*, vol. 44, no. 2, pp. 15-29, Jan. 2012. Available https://www.researchgate.net/publication/267338202_Metales_pesados_como_indicador_de_impacto_de_un_sistema_ecologico_fragmentado_por_usos_de_suelo_San_Luis_Potosi_Mexico_Heavy_metals_as_an_indicator_of_ecological_impact_of_a_fragmented_land_uses_San_L/link/544da71f0cf2d6347f45c9ca/download
- [12] W. Delince, R. Valdez, O. López, F. Guridi and M. Balbín, "Riesgo agroambiental por metales pesados en suelos con cultivares de *Oryza sativa* L y *Solanum tuberosum* L," *Rev Cie Téc Agr.*, vol. 24, no. 1, pp. 44-50, Enero-Marzo 2015.
- [13] Sierra, M. 2005. Niveles de metales pesados y elementos asociados en suelos de la provincia de Almería: parámetros que los afectan y riesgos de contaminación. Tesis para optar al grado de doctor. Universidad de Granada. Granada, España.
- [14] Herrera, J., Rodríguez, J., Coto, J.M., Salgado, V., Borbón, H. 2013. Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Tecnología en Marcha*, 26(1), 27-36.
- [15] Angulo, F. 2013. Informe Estado de la Nación: Manejo, disposición y desecho de las aguas residuales en Costa Rica. Consultado 10 de marzo del 2015. Recuperado de http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/019/angulo_2013.pdf.
- [16] L. Merino et al., "Balance armonía con la naturaleza" de ESTADO DE LA NACION 2020, Programa Estado de la Nación, San José, Costa Rica, 2020, pp. 339-377.
- [17] J.A. Hernández, M.T. Fernández, A. Ortuño. y M.A. Alarcón, "Influencia del uso del suelo en su calidad ambiental en medio semiárido (Murcia SE España)". *Revista de ciencias agrarias*, 2010. Disponible en http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2010000100021

- [18] Programa Estado de la nación. 2018. Informe estado de la nación 2018. Capítulo IV: Armonía con la naturaleza. Pavas, Costa Rica.
- [19] G. Rodríguez, “Ríos limpios: estrategia nacional para la recuperación de cuencas urbanas 2020-2030”, MINAE, San José, Costa Rica, 2020
- [20] L.P. Marín, Informe acerca de la eficacia del estado para garantizar la calidad del agua en sus diferentes usos. Contraloría General de la República. Informe DFOE-AE-IF-01-2013 del 15 de febrero, 2013.
- [21] APHA, AWWA and AEF, “Standard methods for the examination of water and wastewater”, 23rd ed. WA, DC, USA, 2017.
- [22] MINAE, “Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales”, La Gaceta, no. 33903-MINAE-S, 2007.
- [23] MINAE, “Reglamento para la calidad del agua potable”, La Gaceta, no. 38924-S, 2015

Efecto de niveles de aplicación de guano de islas en incremento de frutos de cacao

Effect of application levels of guano of islands in increase of cocoa fruits

Máximo Parco-Quispe¹, Alina Alexandra Camacho-Villalobos²,
Jhimy Andy Parco-Quinchori³, Fiorela Edith Dionisio-Saldaña⁴

Fecha de recepción: 26 de enero de 2021
Fecha de aprobación: 8 de mayo de 2021

Parco-Quispe, M; Camacho-Villalobos, A.A; Jhimy Andy Parco-Quinchori, J.A; Dionisio-Saldaña, F.E. Efecto de niveles de aplicación de guano de islas en incremento de frutos de cacao .*Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 105-114.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5595>



- 1 Investigador en Cultivo de Cacao de la EEA, Instituto Nacional de Innovación Agraria – Pichanaqui. Perú. Correo electrónico: mparcoq@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-0040-4086>
- 2 Coordinadora Nacional de Cultivo Agroindustriales y Agroexportación de café y cacao del Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA. Perú. Correo electrónico: acamacho@inia.gob.pe
 <https://orcid.org/0000-0002-8542-857X>
- 3 Investigador en Control de Plagas con entomopatógenos de la Universidad Hermilio Valdizan de Huánuco. Perú. Correo electrónico: jhmparco@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-7958-3197>
- 4 Apoyo Logístico de la Universidad Nacional del Centro del Perú – Huancayo. Perú. Correo electrónico: fiodisa2711@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-9769-6782>

Palabras clave

Abono; productividad; selva central; *Theobroma cacao*; campaña productiva.

Resumen

El experimento se realizó en dos campañas agrícolas, por problemas de baja productividad del cultivo de Cacao orgánico en la Selva Central, con el objetivo de determinar la dosis óptima de aplicación de guano de islas por planta, elevar la productividad del cacao y el ingreso económico de los productores, las cantidades que se aplicaron por tratamiento fueron: T1 300 g, T2 400 g, T3 600 g, T4 800 g, T5 1000 g, y T6 sin abonamiento. Las aplicaciones se realizaron en dos momentos: la primera dosis (50 %) antes del inicio de la floración en el mes de octubre de 2016 y la segunda durante el crecimiento de frutos en el mes de marzo de 2017. En la segunda campaña 2017 y 2018 se siguió el mismo procedimiento. Las variables evaluadas fueron: número de frutos por planta, peso de mazorcas maduras, número de almendras por mazorca, peso de almendras secas por mazorca y rendimiento de almendra seca/ha. La aplicación de guano de islas se realizó haciendo pequeños hoyos en media luna en la parte alta a 50 cm de distancia del tallo de la planta, como resultado se encontró un incremento en número de frutos por planta, peso de mazorcas maduras, número de almendras por mazorca y peso de almendra seca. En conclusión, las dosis que influyeron en mayor productividad de cacao, fueron T4 800 g y T5 1000 g por planta, también se observó que en la primera campaña el incremento fue mayor que la segunda campaña.

Keywords

Fertilizer; productivity; central forest; *Theobroma cacao*; productive season.

Abstract

The experiment was carried out in two agricultural campaigns, due to problems of low productivity of organic cocoa cultivation in the Central Selva, with the objective of determining the optimal dose of application of island guano per plant, increasing cocoa productivity and economic income of the producers, the amounts applied per treatment were: T1 300 g, T2 400 g, T3 600 g, T4 800 g, T5 1000 g, and T6 without fertilizer. The applications were made in two moments: the first dose (50%) before the start of flowering in the month of October 2016 and the second during the fruit growth in the month of March 2017. In the second campaign 2017 and 2018 the same procedure was followed. The variables evaluated were: number of fruits per plant, weight of ripe ears, number of almonds per ear, weight of dry almonds per ear and dry almond yield / ha. The application of island guano was made by making small holes in a half moon in the upper part 50 cm away from the stem of the plant, as a result an increase was found in the number of fruits per plant, weight of ripe pods, number of almonds per ear and weight of dry almond. In conclusion, the doses that influenced greater cocoa productivity were T4 800 g and T5 1000 g per plant, it was also observed that in the first campaign the increase was greater than the second campaign.

Introducción

La productividad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la selva central cada vez es más bajo, por efecto de la degradación del suelo a causa de las continuas cosechas sin restitución de nutrientes para conservar la fertilidad natural del suelo, otros factores que influyen negativamente son el cambio climático, el desconocimiento acerca del requerimiento nutricional

del cacao por parte de los pequeños y medianos productores y el hecho de que desconozcan dosis adecuada de aplicación de abonos orgánicos para mejorar la productividad del cultivo; pese a que existe la disponibilidad de guano de Islas a precio social que distribuye el Ministerio de Agricultura a través de Agro Rural; como antecedentes no existen trabajos de investigación de aplicación de Guano de Islas en el cultivo de cacao, solo se cuenta con recomendaciones técnicas aisladas en base a la experiencia de profesionales. Algunos de estos antecedentes se describen a continuación.

Uribe et al. [1] evaluaron el efecto de niveles de nitrógeno, fósforo y potasio sobre la producción de cacao y encontraron una mayor respuesta para una dosis alta de N,P y K en el tratamiento 150-90-200 kg/ha de N, P_2O_5 y K_2O , con rendimiento de almendra seca de 1160 Kg/ha que superó al testigo que equivalen a 50% en un promedio de 5 años de evaluación, seguido por el tratamiento 100-90-200 kg/ha de N, P_2O_5 y K_2O , con rendimiento promedio de 1049 kg/ha de grano que equivale un incremento del 40% frente al testigo en una plantación de cacao sin sombra, en cambio en el área de santa Marta en el Caribe Colombiano en una plantación de cacao constituida por mezcla de híbridos, se encontró que los mejores rendimientos se obtuvieron con la aplicación de 350 kg/ha de las formulas 13-26-4 y 12-6-22-2. La primera produjo 1077 kg/ha y la segunda 1020 kg/ha que representan incrementos de 383 y 325 kg sobre el testigo (694 kg/ha), respectivamente [2].

Borrero [3] recomienda para cacaotales mayores de 5 años de edad aplicar 562 g/planta/año fraccionado en dos o tres partes con el fertilizante compuesto de fórmula 12-24-12 en periodos de lluvia. Alvares et al. [4] afirma que los esquemas de manejo orgánico son una alternativa para las plantaciones de cacao debido al aumento de la producción encontrado en comparación al manejo químico.

Sánchez et al. [5] experimentaron con dosis de NPK y no detectaron efecto del fertilizante NPK sobre las plantas de Cacao a causa de la amplia variabilidad del material vegetal que usualmente existe en las plantaciones comerciales. Triano et al. [6] reportaron mejoras en los contenidos de Mo, N, P, K y Ca en el suelo, aumenta el pH y manifiesta que estos componentes disminuyen en época seca, por eso la aplicación de abonos orgánicos es sustentable en el cultivo de cacao.

Guerrero [7] menciona que los fertilizantes aumentan la fertilidad de los suelos y proporcionan un medio para mantener niveles adecuados de fertilizantes en los suelos, reemplazan los elementos nutritivos extraídos por las cosechas y pérdida de percolación, fijación y otros; permitiendo alcanzar rendimientos unitarios elevados de cultivos en corto plazo.

Arvelo et al., [8] recomienda que para obtener un buen rendimiento del cultivo de cacao se debe manejar bien la sombra y fertilización; para mayores de 4 años en producción de cacao aplicar 600 g/planta de la fórmula 20 - 20 -20 y 45 g/planta de K - Mg; la primera dosis aplicar antes de 6 meses de pico de cosecha y la segunda dosis a los 4 meses antes de pico de cosecha.

Leiva [9] menciona que según experiencia de Ecuador cuando el nivel tecnológico se eleva, la productividad de cacao puede triplicarse con estrategias de uso de tecnología como el uso de clones mejorados, riego, poda sanitaria y abonamiento suficiente acorde a la demanda del cultivo; por ejemplo, la plantación en pleno sol con CCN 51 la extracción de nutrientes con 2 222 plantas/ha es alto también se menciona que una tonelada de cacao seco extrae 40 kg de N, 6 kg de P y 36 kg de K [10].

En la selva central de las provincias Chanchamayo y Satipo existen más de 21,000 hectáreas de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.), de los cuales el 80% está en manos de pequeños, medianos productores y comunidades nativas, con escaso conocimiento del efecto de aplicación de guano de las islas para mejorar la productividad de plantaciones de

cacaotales a pesar que es un abono orgánico completo disponible que distribuye Ministerio de Agricultura a través de Agro Rural, por ello el objetivo de este trabajo de investigación es determinar la dosis óptima de aplicación de guano de las islas por planta para elevar el rendimiento de cultivo de cacao orgánico por unidad de área y contribuir con el incremento de los ingresos económicos de los pequeños, medianos productores y comunidades nativas de la selva central.

Materiales y métodos

Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el marco del convenio del INIA y Agro Rural, en el campo experimental de la Estación Experimental Agraria Pichanaki, del distrito de Pichanaki, provincia de Chanchamayo, departamento Junín (figura 1) a los 523 m.s.n.m con temperatura promedio anual 25 °C, precipitación 1500 mm. (SENAMHI, 2017-2018).

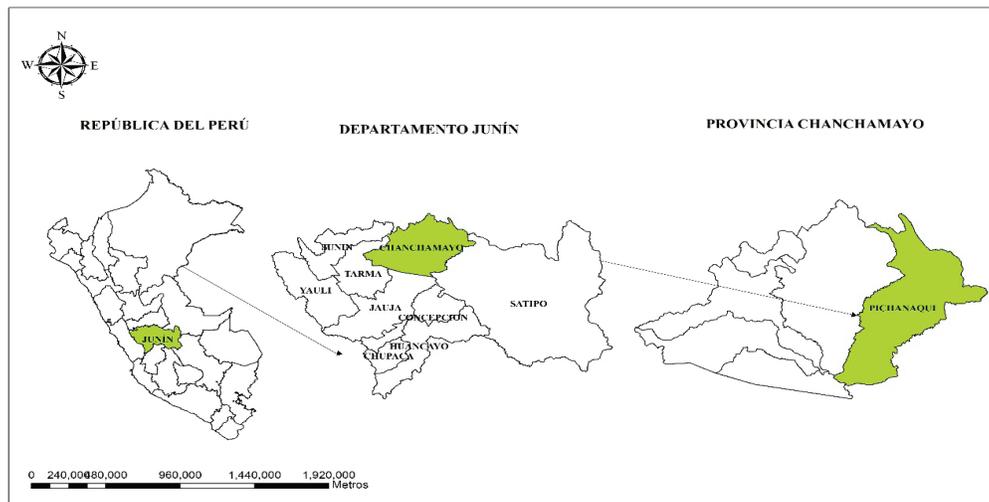


Figura 1. Ubicación del experimento.

Tiempo de ejecución

El experimento se realizó en dos campañas agrícolas 2016 – 2017 y 2017 – 2018.

Diseño del experimento

Se utilizó el diseño experimental Bloques al azar con 6 tratamientos y 3 repeticiones. El experimento se instaló en un terreno con 30% de inclinación con un pH de 5,84 con plantación de cacao de seis años de edad del clon CCN 51, con un distanciamiento de siembra de 3 m x 3 m y una densidad poblacional de 1 111 plantas por ha, en sistema agroforestal.

Descripción de los tratamientos empleados

Los tratamientos estuvieron representados por las diferentes dosis de aplicación de guano de islas por planta (cuadro 1). Estas aplicaciones se realizaron en dos fracciones, el 50% de la cantidad total se aplicó en el mes de octubre al inicio de floración y la segunda dosis se aplicó en el mes de marzo durante el crecimiento de frutos en la segunda campaña se siguió el mismo procedimiento. El guano de Isla se aplicó en 4 hoyos en la parte superior en media luna a 50 cm de distancia del tallo.

Cuadro 1. Dosis de guano de islas aplicado por planta de cacao adulto Clon CCN-51.

Nutrientes aplicados/planta							
Tratamiento	Cantidad (gr/planta)	Nutrientes en el guano de islas					
		N	P ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	S
T1	300	0,03	0,03	0,006	0,03	0,0024	0,0045
T2	400	0,04	0,04	0,008	0,04	0,0032	0,006
T3	600	0,06	0,06	0,012	0,06	0,0048	0,009
T4	800	0,08	0,08	0,016	0,06	0,0016	0,012
T5	1000	0,1	0,1	0,02	0,1	0,008	0,015

Evaluación de variables

Se realizó mensualmente en las dos campañas agrícolas. Las variables evaluadas para determinar la productividad fueron: número de frutos por planta, peso de mazorcas maduras, número de almendras por mazorca, peso de almendras secas por mazorca, por plantas y por ha. Para la evaluación de variables se utilizó balanzas de precisión, material de escritorio, herramientas como: tijera telescópica, machete, motoguadaña, serruchos de podar, tijeras de podar y azadón.

Análisis de datos

Para la prueba de hipótesis se utilizó un análisis de varianza al 1 % de nivel de significancia, para determinar la significación entre tratamientos y repeticiones. Para la comparación de promedios de los tratamientos se utilizó la prueba de Rangos Múltiples de Duncan al 1 % de nivel de significancia, para determinar la significación entre tratamientos. Se trabajó con el software SPSS versión de prueba [11].

Resultados y discusión

En la campaña 2017 el tratamiento con mayor número de frutos fue T4 con 21,9 frutos/planta seguido por T3 con 17,5 frente al testigo T6 con 12,9 frutos/planta. En la campaña 2018 el mayor número de frutos por planta corresponde al T4 con 17,47 seguido por T5 con 15,6 frutos frente al testigo, T6 con 10,5 (Cuadro 2). El menor rendimiento que se observa en la segunda campaña agrícola frente al primero es posible por bajo contenido de guano de islas en potasio, magnesio y azufre, siendo el potasio el elemento que más necesita el cacao.

En la campaña 2017 en la evaluación de peso de mazorcas maduras por planta, el T5 supera a los demás con 906 g, seguido por T4 con 900,7 g mientras que el testigo T6 obtuvo el valor más bajo con 727,97 g. En la campaña 2018 el tratamiento con mayor peso de fruto fue T3 con 781,6 g, seguido por T5 con 738,6 g frente al testigo T6 con 629,4 g (cuadro 2).

En la campaña 2017 el tratamiento con mayor número de almendras por mazorca fue T4 con 63,33 seguido por T5 con 63,2 almendras frente al testigo T6 con 56,5 almendras por mazorca. En la campaña 2018 el T5 ocupa el primer lugar con 57,6 almendras seguidas por T4 con 57,6 almendras y el testigo T6 resulta con 54,13 almendras (cuadro 2).

En la campaña 2017 ocupa el primer lugar T5 con 98 gramos de almendra seca por mazorca, seguido por T4 con 91,3 g frente al testigo T6 que tiene 84,3 g. En la campaña 2018 el T4 supera al resto con 54,7 g seguido T5 con 54,6 g frente al testigo con 49,4 g (cuadro 2).

Cuadro 2. Resumen de evaluación en dos campañas de dosis de guano de islas aplicado por planta de cacao adulto Clon CCN-51, en los meses de mayor cosecha.

Trat.	Evaluación de número de frutos/planta		Peso promedio de mazorcas madura		Número de almendras/mazorca		Evaluación peso de almendra seca/mazorca	
	Campaña							
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
T1	14,9 ab	11,4 ab	766,6 ab	666,6 a	59,0 a	56,07 a	86,7 ab	52,4 b
T2	15,7 ab	14,1 bc	781,0 ab	667,9 a	61,0 a	56,5 a	87,7 ab	52,6 b
T3	17,5ab	14,5 cd	821,3 ab	781,6 a	62,5 a	57,2 a	88,7 bc	54,0 b
T4	21,9 b	17,5 d	900,8 b	728,3 a	63,3 a	57,6 a	91,3 c	54,7 b
T5	15,3 b	15,6 cd	906,0 b	738,6 a	63,2 a	57,6 a	98,0 d	54,6 b
T6	12,9 a	10,5 a	727,9 a	629,4 a	56,50 a	54,1 a	84,3 a	49,4 a
CV	12,71	7,95	9,24	13,13	5,9	10,8	1,43	1,64
E.E	0,8	0,45	0,61	0,63	2,07	3,52	0,52	0,5
p-valor	0,0073	0,0002	0,0774	0,4037	0,2218	0,9787	<0,0001	0,0002

En la campaña 2017 el mayor rendimiento en almendra seca/ha corresponde al T4 con 1800,5 Kg/ha seguido por T5 con 1601,3 kg frente al testigo T6 con 1181,9 kg. En la campaña 2018, T4 supera al resto con 1358,4 kg/ha seguido por T5 con 1328,4 Kg frente al testigo T6 con 996,68 kg (figura 2).

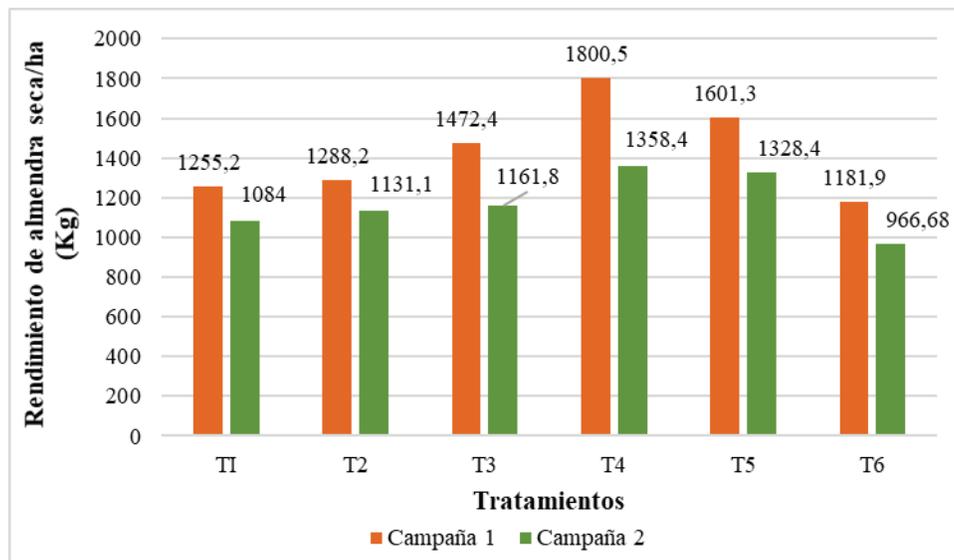


Figura 2: Evaluación de rendimiento de almendra seca/ha.

El costo de mantenimiento es el costo de labores agrícolas durante la campaña agrícola como son control de malezas, plagas, podas, cosechas fertilización (cuadro 3).

Cuadro 3. Costo de mantenimiento de 1 ha del cultivo de cacao/campaña agrícola.

Nº	Actividades	Valor total S/.
1	Control de malezas 3 veces/año	900.00
2	Poda	400.00
3	Eliminación de brotes	200.00
4	Aplicación de fertilizantes	120.00
5	Cosecha y post cosecha	600.00
6	Comercialización	200.00
Subtotal		2,420.00
Imprevisto 10%		242.00
Gastos administrativos 5%		121.00
TOTAL		2,783.00

El costo de mantenimiento es igual para todos los tratamientos que es la suma S/. 2,783.00 (cuadro 4).

Cuadro 4. Costo de producción/tratamiento/ha.

TRAT.	Costo de mantenimiento (S/.)	Costo de fertilizante (S/.)	Costo total (S/.)
1	2,783.00	333.00	3,116.00
2	2,783.00	444.40	3,227.40
3	2,783.00	666.60	3,449.60
4	2,783.00	888.80	3,671.80
5	2,783.00	1,111.00	3,894.00
6	2,783.00	0.00	2,783.00

El costo de producción total comprende el costo de mantenimiento más el costo de guano de las islas aplicadas por tratamiento. En este caso T5 tiene mayor costo de producción con S/. 3,894.00/ha seguido por T4 con S/. 3,671.80, mientras el testigo tiene menor costo con S/. 2,783.00, porque no se aplicó guano de las islas (cuadro 4).

Cuadro 5. Ingreso bruto, costo de producción e ingreso neto por tratamiento/ha de la campaña 2017.

TRAT.	Ingreso Bruto Total/ha (S/.)	Costo De Producción Por Trat. (S/.)	Ingreso Neto/Tratamiento/ha (S/.)
1	7,531.2	3,116.00	4,415.2
2	7,729.2	3,227.40	4,501.8
3	8,834.4	3,449.60	5,384.8
4	10,803.9	3,671.80	7,132.1
5	9,607.8	3,894.00	5,713.8
6	7,091.4	2,783.00	4,308.4

En la campaña 2017 genera mayor ingreso económico el T4 con S/. 7,132.1 seguido por T5 con S/. 5,713.8 ha frente el testigo T6 con S/. 4 308.8 (cuadro 5).

En la campaña 2018, T4 genera mayor ingreso neto con S/. 4478.42 seguido por T5 con S/. 4077.00 frente al testigo T6 con 3017.00 (Siendo precio por kilo de almendra seca S/. 6.00) (cuadro 6).

Cuadro 6. Ingreso bruto, Costo de producción e ingreso neto por tratamiento/ha de la campaña 2018.

TRAT.	Ingreso Bruto Total/Ha (S/.)	Costo De Producción Por Trat. (S/.)	Ingreso Neto/Tratamiento/Ha (S/.)
1	6,503.34	3,116.00	3,387.34
2	6,786.65	3,227.40	3,559.25
3	6,971.30	3,449.60	3,521.70
4	8,150.22	3,671.80	4,478.42
5	7,971.00	3,894.00	4,077.00
6	5,800.00	2,783.00	3,017.00

Los suelos fértiles mejoran el rendimiento de la cosecha e influyen directamente en los ingresos económicos de los agricultores, sin embargo, las siembras continuas sin descanso ni rotación de cultivos deterioran el medio ambiente, frente a ello, una alternativa de solución es el guano de las islas que ofrece mejores resultados por su composición química [12].

Arvelo et al. [8] y Ruales el al. [13] con la aplicación de fertilizantes compuestos yara mila Hydran (500 g), Nitrabor (300 g), K, Mg (250 g) y KCl granulado (50 g) en total 1 150 g/árbol/año en tratamiento aplicados en 3 fracciones, en cacao híbrido obtuvieron un rendimiento de 2 910 kg/ha corroborado que mayor cantidad de aplicación de nutrientes NPK influye en mayor rendimiento por unidad de área en cacao. Este rendimiento es superior a lo obtenido en esta investigación cuyo valor más alto fue de 1800.5 kg/ha. Estas diferencias posiblemente se deben a los diferentes tipos de fertilización empleada y a los diferentes híbridos.

En países como Colombia con la aplicación de 80, 150, 160 Kg de NPK se obtuvo 721 kg/ha frente el testigo 425 Kg/ha con la fórmula de aplicación de 120 N, 100 P₂O₅, 160 K₂O, 25 MgO, 150 S, 5 B, 0,5 Zn, 0,25 Cu y 1 Mn obtuvo un rendimiento de 1164,67 kg/ha de almendra seca con la variedad CCN51, valor inferior a lo reportado en esta investigación para una fertilización orgánica con guano de isla que alcanzó valores de hasta 1800.5 kg/ha [10].

Antes de recomendar la aplicación de la cantidad de fertilizantes se hace un diagnóstico al pH del suelo, en promedio 1000 Kg de semilla extrae 30 Kg. de N, 8 Kg de P₂O₅, 40 Kg de K₂O, 13 kg CaO y 10 kg de MgO, además extrae en cascara y en el cuerpo del árbol todo esto tiene que considerar, aunque existen 13 nutrientes que expresan deficiencias, se debe realizar por lo menos de 3 a 4 aplicaciones por campaña para cada planta aplicar 60 g de N, 30 g de P₂O₅, 72 g de K₂O y 240 g de SO₄ por planta el primero se puede aplicar Enero – Febrero el segundo abril o mayo, el tercero julio o agosto y el cuarto octubre o noviembre. Los elementos faltantes como potasio, magnesio y azufre se deben completar de otras fuentes en caso de aplicación sucesivas solamente con guano de las islas puede bajar la productividad por elementos faltantes [14].

Sánchez et al. [5] recomienda para plantaciones de cacao de 6 años de edad se debe aplicar de 356 a 423 g de guano de islas por planta en cada una de las 3 fracciones que equivale 457 – 543 Kg/ha, lo que coincide con las dosis aplicadas en esta investigación; además, recomiendan agregar de 85,7 a 101,3 g de sulfato de potasio en cada fracción que equivale de 110 a 150 Kg/ha.

Quevedo [15] menciona la técnica de abonamiento y poda sincronizada en cacao consiste en realizar abonamiento y poda en tres etapas durante la campaña de producción de cacao en intervalos de 3 a 4 meses, en cada etapa se abona antes de 15 días de podar, por ejemplo, para una producción de 2,500 Kg/ha recomienda 1.8 kilos de guano de isla, valor superior a lo reportado en esta investigación; por otro lado, recomienda aplicar 0.93 kg de roca fosfórica, 0,340 Kg de sulfato de potasio, 105, 7.5 Kg de sulfato de magnesio.

Sánchez et al. [16] señala que los requerimientos de nutrientes para producir una cosecha de 1000 kilos de cacao seco son de 31 a 40 k de N, 5 a 6 kg de P, 54 a 86 kg de K, 5 a 8 Kg de Ca y 5 a 6 kg de Mg. En base a estos requerimientos una buena opción es la aplicación del guano de islas con el que se obtiene rendimientos de hasta 1800.5 kg/ha para el Clon CCN 51.

Rosas et al. [17] menciona que el factor limitante del uso eficiente de los nutrientes es la acidez del suelo, por lo tanto, con el encalado y aplicación de nutrientes NPK Incrementa de manera distinta con los clones ICS-1, ICS-39, TSH-565, CCN-51; demostrando que el clon CCN-51 presenta mayor habilidad de aprovechamiento de nutrientes, observándose también que la fertilidad natural del suelo en esas condiciones son suficientes para una buena producción de cacao. Además, de este tipo de fertilización se puede emplear la fertilización orgánica con guano de islas por ser más económico y estar al alcance del productor local.

Conclusiones

La aplicación de guano de las islas en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) generó resultados positivos ya que incrementó el número de frutos por planta, peso de mazorcas maduras, número de almendras/mazorca, peso de almendras secas/planta/ha y consecuentemente genera mayor ingreso económico para el productor a pesar que el fertilizante tiene bajos nutrientes en potasio, magnesio y azufre que debe ser complementado de otras fuentes para obtener mayor rendimiento; la dosis que ha influido en mayor rendimiento de almendra en la mayoría de las evaluaciones es el T4 con 800 g por planta en suelos de mediana fertilidad, para suelos de buena fertilidad, se puede aplicar los tratamientos T1 300 g, T2 400 g, y T3 600 g y para suelos de baja fertilidad el T5 1000 g/planta.

Referencias

- [1] A. Uribe, H. Méndez, J. Mantilla. Efecto de niveles de nitrógeno, fósforo y potasio sobre la producción de cacao en suelo del Departamento de Santander. Revista Suelos Ecuatoriales, vol. 28, pp. 31-36. 1998.
- [2] G. Quiroz, A. Bonilla. Abonamiento del Cacao (*Theobroma cacao* L.) con fertilizantes compuestos en el corregimiento de Río Frío, zona bananera. Tesis de pregrado para la obtención del título profesional de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ingeniería, Universidad de Magdalena. Cartagena, Colombia. 1981.
- [3] C. A. Borrero. Fertilización del cultivo de cacao en sitio definitivo. 2009. Disponible en: http://cadenacacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/FERTILIZACION_DEL_CULTIVO_DE_CACAO_EN_SITIO_DEFINITIVO.pdf
- [4] F. Alvares, J. Rojas, J. C. Suarez. Contribución de esquemas de fertilización orgánica y convencional al crecimiento y producción de *Theobroma cacao* L. bajo arreglo agroforestal en rivera (Huila, Colombia). Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, vol.16, n° 2, pp.307-314. 2015.
- [5] L. E. Sánchez, D. Parra, E. Gamboa, J. Rincón. Rendimiento de una plantación comercial de cacao ante diferentes dosis de fertilización con NPK en el sureste del Estado Tachira, Venezuela. Bioagro, vol. 17, n° 2. Pp. 119-122. 2005.

- [6] A. Triano, D. J. Palma, S. Salgado, L. C. Espinoza, V. Córdova. Nutrición orgánica en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao L.*) en Tabasco, México. Revista Agro productividad, vol. 9, pp. 39-44. 2016.
- [7] L. J. Guerrero. Análisis del suelo y fertilización del cacao. Manual de Oficina Académica de extensión y Proyección social. Agrobanco. Juanjui. San Martín. 36 p. 2012.
- [8] M. A. Arvelo, D. González, S. Moroto, T. Delgado, P. Montoya. Manual técnico del cultivo de cacao, buenas prácticas para América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 143 pp. 2017.
- [9] E. I. Leiva. Aspectos para la nutrición de cacao (*Theobroma cacao L.*). Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Agricultura y tecnologías relacionadas / Agricultura. Repositorio Institucional. 13 p. 2012
- [10] V. Ludeña. Efecto de fertilización orgánica y microelementos en el rendimiento de cacao CCN51 (*Theobroma cacao L.*) en Jaén. Tesis de grado para optar el título profesional de ingeniero en recursos naturales renovables con mención en conservación de suelos y agua. Facultad de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional Agraria de la Selva. 146 p. Perú. 2013.
- [11] M. E. Milla, D. A. Villegas. La metodología de la investigación en el marco de la agroproducción sustentable. Revista de Investigación agroproducción sustentable, vol. 1, nº 3, pp. 68-71. 2017.
- [12] Agro Rural. Manual de abonamiento con guano de las islas en cacao. Revista Agrorural. 1era edición, Editor Agro rural. Lima, Perú. 123 pp. 2018. Disponible en: <https://www.agrorural.gob.pe/wp-content/uploads/transparencia/dab/material/MANUAL%20DE%20ABONAMIENTO%20CON%20G.I..pdf>
- [13] J. L. Ruales, H. Burbano, W. Ballesteros. Efecto de fertilización con diversas fuentes sobre el rendimiento de cacao (*Theobroma cacao L.*). Revista de Ciencias Agrícolas, vol. 28, nº 2, pp. 81-94. 2011.
- [14] R. C. Sánchez. Cultivo y producción de cacao. Lima. Perú. 134 p. 2012.
- [15] C. Quevedo. Técnica de abonamiento y poda sincronizada. Boletín informativo. 15 p. 2014.
- [16] F. Sanchez, E. Luis, D. Parra, E. Gamboa, J. Rincon. Rendimiento de una plantación comercial de cacao ante diferentes dosis de fertilización con NPK en el sureste del estado de aTáchira, Venezuela. Bioagro, vol. 17, nº 2, pp. 119-122. 2005.
- [17] G. Rosas, Y. J. Puentes, J. C. Mejivar. Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao L.*) en la Amazonia colombiana. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, vol. 20, nº 1, pp. 5-16. 2019.

Variabilidad de densidad en sentido radial y dentro de un anillo de crecimiento en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de 25 años de edad

Density variability in radial direction and in growth ring of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* from plantations of 25 years old

Gabrialy Márquez-Carrero¹, Styles W. Valero²,
Williams J. León-Hernández³, Ilvania J. Gutiérrez-Gotero⁴,
Julio C. Maldonado-Rangel⁵

Fecha de recepción: 7 de febrero de 2021

Fecha de aprobación: 17 de junio de 2021

Márquez-Carrero, G; Valero, S. W; León-Hernández, W.J; Gutiérrez-Gotero, I.J; Maldonado-Rangel, J.C. Variabilidad de densidad en sentido radial y dentro de un anillo de crecimiento en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de 25 años de edad. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 115-124.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5866>

- 1 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio de Anatomía de Maderas. Venezuela.
Correo electrónico: gabrialy@gmail.com
- 2 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Sección de Ensayos. Venezuela.
Correo electrónico: styles@ula.ve
- 3 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio de Anatomía de Maderas. Venezuela.
Correo electrónico: wleon@ula.ve
- 4 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Sección de Pulpa y Papel. Venezuela. Correo electrónico: ilgutie@ula.ve
- 5 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio de Anatomía de Maderas. Venezuela.
Correo electrónico: jmaldonado@ula.ve



Palabras clave

Densidad; traqueidas; anillo; médula; corteza.

Resumen

El presente trabajo corresponde al estudio de la densidad de madera seca al aire en 6 árboles de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) W. Barret & Golfari (Pinaceae) provenientes de plantaciones de 25 años de edad establecidas en Uverito (estado Monagas, Venezuela). Se tomaron muestras en 3 posiciones de la sección transversal del tallo: adyacencias de médula (muestra de todo el anillo de crecimiento), y a la mitad del radio (muestra en madera temprana y madera tardía) y adyacencias de zona cambial (muestra de todo el anillo de crecimiento). La densidad se determinó bajo la Norma DIN 52-182. A través de la sección transversal se encontró un incremento de la densidad desde las adyacencias de médula hacia la zona cambial (0,595 en adyacencias de médula; 0,681 en el punto medio y 0,820 g/cm³ en las adyacencias de la zona cambial). Por otra parte, el peso específico de madera tardía (0,806 g/cm³) mostró valores notablemente superiores con respecto a la madera temprana (0,557 g/cm³). De acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$), existen diferencias estadísticamente significativas entre el peso específico de adyacencias de médula con respecto a las cercanías del cambium; así como también las diferencias encontradas entre madera temprana y madera tardía del anillo de crecimiento tuvieron significancia estadística.

Keywords

Density; tracheids; growth ring; pith; bark.

Abstract

This paper deals about air-dry density in wood from six trees of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) W. Barret & Golfari (Pinaceae) from 25 years old plantations growing in Uverito (Monagas state, Venezuela). Samples were taken in three positions of cross section: near of pith (all growth ring), middle point (sample for early wood and sample for late wood) and near of cambium (all growth ring). Density was obtained according DIN 52-182. Density grows from pith to cambium (0,595 near of pith; 0,681 in middle zone and 0,820 g/cm³ near of cambium). In late wood, we found higher values in air-dry density (0,806 g/cm³) in comparison with early wood (0,557 g/cm³). According Tukey test ($\alpha = 0,01$), there are significatives differences between air-dry density in pith zone-cambial zone and between early and late wood.

Introducción

La utilización apropiada de la madera requiere del conocimiento de sus propiedades físicas y sus características anatómicas, especialmente la relación que existe entre propiedades y anatomía de la madera. La densidad y peso específico es una de las propiedades físicas más importantes de la madera ya que es un indicativo de la respuesta que puede tener la madera ante otras propiedades físico-mecánicas, además de definir comportamientos tanto en procesamiento como en utilización. [1] señalan que el valor de la densidad y peso específico puede ser un indicativo de propiedades de resistencia, tasas de contracción, capacidad aislante de la madera, etc. [2] y [3] indican que el peso específico depende de tres factores: tamaño de las células, el espesor de sus paredes y la interacción entre el número de células de diferentes tipos. Si se analizan cada uno de esos factores, se puede observar que corresponden a la estructura anatómica de la madera. La variación de algunas características anatómicas también

puede influir sobre variaciones en el peso específico. En el caso particular de coníferas, por ser maderas constituidas principalmente por traqueidas, cualquier cambio en este tipo celular se refleja sobre el peso específico; esto es especialmente observado entre las zonas de madera temprana y madera tardía de los anillos de crecimiento [4]. [2] y [5] presentan información acerca de las diferencias de peso específico entre la madera temprana y madera tardía de los anillos de crecimiento de algunas coníferas. [6], estudiando *Pseudotsuga menziesii*, encontraron correlación entre la densidad de la madera y la proporción de material de la pared celular, aunque esta relación no fue perfectamente lineal y las principales características anatómicas responsables del incremento de la densidad fueron el engrosamiento de las paredes de las traqueidas y la disminución de su diámetro radial. Por otra parte, [7] encontraron una alta correlación entre la densidad y las características anatómicas de la madera tardía en *Pinus sylvestris*.

Con respecto a la variación de peso específico en sentido radial, [8] realizaron el estudio de *Retrophyllum rospigliosii* (Podocarpaceae) tomando en consideración diferentes niveles de altura y posiciones en la sección transversal encontrando una ligera tendencia de disminución de la densidad básica desde la médula hacia las adyacencias de la corteza.

Con respecto a el *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, es una especie de gran valor comercial agregado y potencial de uso, teniendo un mercado asegurado en el sector de la construcción. Adicionalmente se debe mencionar que el *Pinus caribaea* var. *hondurensis* establecido en la Orinoquia venezolana presenta las características propias de lo que se denomina como “madera de obra”, es decir, comparativamente presenta un rápido crecimiento permitiendo una satisfactoria rentabilidad económica, propiedades físicas y mecánicas conocidas, fácil de secar, fácil de preservar, un sistema de mercado afianzado sobre los principios de estandarización y un importante parque industrial, permitiendo el uso masivo y estratégico en el país. En Venezuela, a pesar de tener pocas coníferas autóctonas, es de gran importancia conocer la relación anatomía-propiedades en gimnospermas, ya que se dispone de grandes extensiones plantadas con *Pinus caribaea* las cuales se han venido estableciendo, con fines comerciales, desde 1969. Se han realizado algunos estudios tecnológicos y/o anatómicos de la madera procedente de estas plantaciones [9], [10] y [11]. También se tienen estudios sobre propiedades físicas, mecánicas, trabajabilidad y utilización para el pino caribe y entre estos se pueden mencionar a [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20] y [21]. Otras investigaciones para pino caribe han sido orientados a conocer las características de madera de compresión [22], periodicidad de anillos de crecimiento [23], madera juvenil y adulta [11] y determinación de ángulo de orientación de microfibrillas [10] y [24].

Con respecto a determinación de densidad y peso específico para plantaciones de Venezuela, [9] y [25] presentan datos para diferentes edades de plantación. [14] hacen una comparación entre los valores observados en pino resinado y no resinado. Por otra parte, [26] estudió la variación de densidad y peso específico, en sentido longitudinal y transversal, para plantaciones de 25 años de edad. Sin embargo, no se tiene información del grado de variación del peso específico dentro de un mismo individuo ni dentro de áreas más reducidas como lo son los anillos de crecimiento.

Tomando en cuenta esos aspectos, el objetivo del presente trabajo es la determinación del peso específico seco al aire de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) W. Barret & Golfari (Pinaceae) proveniente de plantaciones de 25 años de edad en tres posiciones de la sección transversal: adyacencias de la médula, punto medio del radio y adyacencias del cambium, incluyendo zonas (punto medio) donde se determinen las diferencias de peso específico entre la madera temprana y tardía de un anillo de crecimiento.

Materiales y métodos

El material de estudio está representado por secciones transversales (discos) de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) W. Barret & Golfari de 25 años de edad procedente de las plantaciones establecidas en Uverito (estado Monagas, Venezuela). Se estudiaron 6 individuos provenientes de un mismo rodal para así minimizar los efectos de las condiciones del medio ambiente sobre la variabilidad que pudiese presentarse en los caracteres que influyen sobre los valores de densidad. Se extrajeron discos o secciones transversales de la porción basal del árbol (figura 1a).

En cada sección transversal se determinó el radio mayor (distancia médula-adyacencias del cambium) y se ubicaron muestras en tres posiciones (figura 1b, cuadro 1): adyacencias de médula (Am), punto medio del radio (Pm) y adyacencias del cambium (Ac).

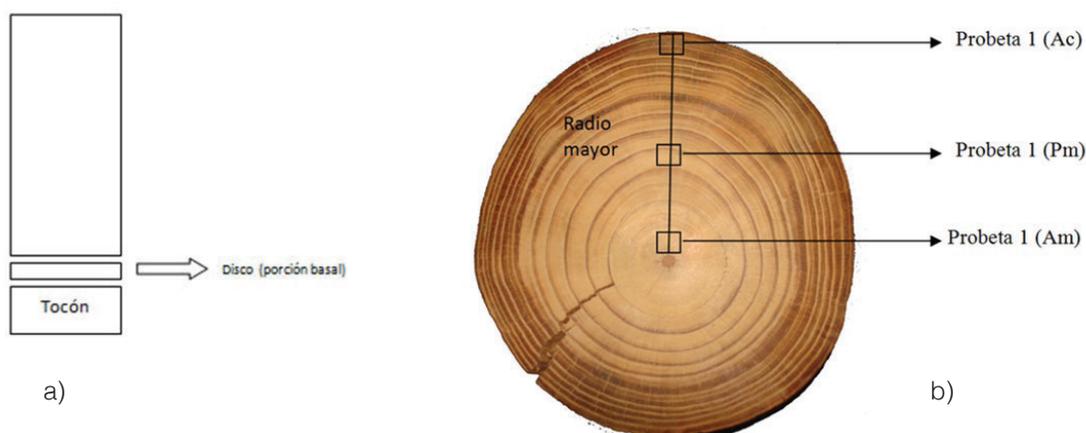


Figura 1. Representación esquemática de la posición de extracción de disco o sección transversal (a) para cada individuo y ubicación de muestra en la sección transversal (b).

Cuadro 1. Radio de las secciones transversales estudiadas y ubicación de muestras en cada punto de muestreo (adyacencias de médula, $\frac{1}{2}$ del radio, y adyacencias del cambium).

Árbol	Radio	Adyacencias de médula	Punto medio	Adyacencias de zona cambial
	cm	cm	cm	cm
1	12,00	0,90 - 1,20	5,60 - 5,90	10,00 - 10,90
2	11,60	1,10 - 1,90	5,60 - 6,20	10,50 - 11,00
3	11,10	1,00 - 1,60	5,90 - 6,20	9,60 - 10,00
4	12,30	1,50 - 2,40	6,10 - 6,40	11,00 - 11,40
5	12,80	0,40 - 1,60	5,80 - 6,20	12,40 - 12,80
6	11,70	0,90 - 1,40	5,80 - 6,20	10,50 - 10,90

Para la determinación de la densidad, en las muestras de adyacencias de médula y adyacencias de zona cambial se ubicaron anillos de crecimiento completos mientras que en la muestra correspondiente al punto medio del radio se delimitó la zona de madera temprana y madera tardía de cada anillo para la determinación individualizada de la densidad seca al aire en cada zona.

Las muestras fueron llevadas a cuarto de acondicionamiento con el fin de aclimatarlas hasta alcanzar el contenido de humedad de equilibrio (CH = 12 %). La densidad se calculó bajo la Norma DIN – 52182 [27] Se determinó el peso de la muestra en una balanza digital marca Mettler - Toledo AB104 con precisión de 0,0001 g, capacidad máxima 101 g y el volumen por el método de desplazamiento de agua. Este procedimiento se realizó en tres fases:

- a. Muestras que incluyan todo el anillo de crecimiento (adyacencias de médula y adyacencias de zona cambial)
- b. Muestras correspondientes a la zona de madera temprana del anillo de crecimiento (muestra a $\frac{1}{2}$ del radio).
- c. Muestras correspondientes a la zona de madera tardía del anillo de crecimiento (muestra a $\frac{1}{2}$ del radio).

Se calculó la densidad seca al aire mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad (12 \%)} = \frac{\text{Peso de la muestra (g) al 12 \%}}{\text{Peso del volumen del agua desplazado (cm}^3\text{) al 12\%}}$$

Para determinar la significancia estadística de las diferencias entre las tres posiciones estudiadas y entre las dos zonas del anillo de crecimiento se realizó un análisis de varianza y prueba de diferencia de medias (Tukey, $\alpha = 0,01$) utilizando el programa SPSS 22.0.

Resultados y discusión

A nivel de los puntos estudiados, se encontró que las muestras cercanas a la médula correspondieron a anillos constituidos principalmente por zonas de madera temprana con una transición gradual hacia una estrecha zona de madera tardía. Por otra parte, las muestras del punto medio presentaron dos áreas claramente diferenciadas de madera temprana y tardía y con una proporción aproximadamente equitativa entre ambas zonas. Con respecto a las adyacencias de la zona cambial, se observó un comportamiento inverso respecto a las cercanías de la médula con anillos donde se encontró una alta proporción de madera tardía combinada con una estrecha franja de madera temprana. Los valores de densidad (cuadro 2, figura 2) oscilaron entre un mínimo de 0,467 g/cm³ (adyacencias de médula del árbol 4) y un máximo de 1,003 g/cm³ (madera tardía del árbol 1). Con la excepción del árbol 3, los menores valores promedio de los tres puntos de medición correspondieron a la zona de adyacencias de médula. En el punto medio, los valores de madera temprana estuvieron por debajo de los observados en madera tardía (cuadro 2, figura 2) y la relación de incremento de una zona a otra osciló entre 1,11 y 1,99, lo que indica aumentos proporcionales que pueden ir desde, aproximadamente, el 10 % hasta cerca del 100 %.

La densidad seca al aire observada en los diferentes árboles y posiciones estudiadas se encuentran, generalmente, por encima de lo reportado por [14] quienes señalan valores que oscilan entre 0,461 g/cm³ y 0,6 g/cm³. Posiblemente, las diferencias se deben a que el estudio de [14] tomaron en consideración árboles de 19-22 años de edad donde incluyeron material que había sido sometido a tratamientos de resinación, en contraste con el material del presente estudio el cual corresponde a plantaciones de 25 años y sin ningún tipo de tratamiento.

Cuadro 2. Valores de densidad seca al aire para cada árbol y las posiciones Am (adyacencias de médula), Pm (punto medio) y Ac (adyacencias de zona cambial).

Árbol	Am (g/cm ³)	Pm (Madera temprana) (g/cm ³)	Pm (Madera tardía) (g/cm ³)	Pm (Promedio) (g/cm ³)	Ac (g/cm ³)
1	0,671	0,548	0,872	0,710	1,003
2	0,576	0,532	0,734	0,633	0,878
3	0,731	0,403	0,803	0,603	0,751
4	0,467	0,637	0,826	0,731	0,813
5	0,505	0,592	0,655	0,624	0,678
6	0,619	0,627	0,947	0,787	0,797

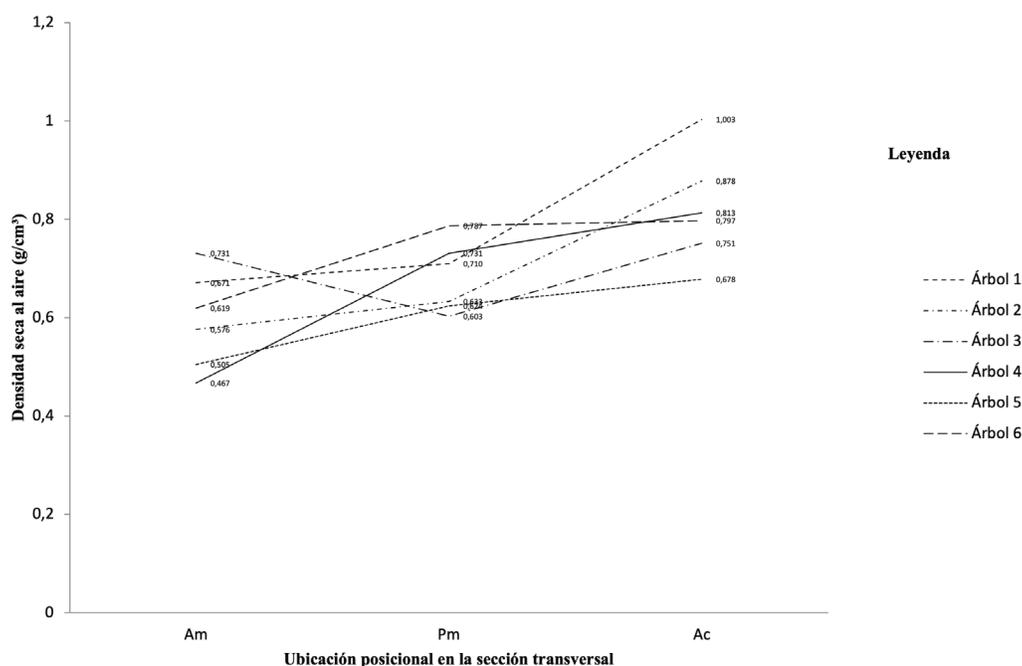


Figura 2. Variación de densidad en sentido transversal (Am = adyacencias de médula; Pm = punto medio; Ac = adyacencias del cambium).

El patrón de variación de la densidad tiene un comportamiento, por lo general, ascendente en sentido radial lo cual coincide con lo reportado para *Pinus taeda* [28] y *Abies religiosa* [29] quienes observaron un incremento de la densidad básica en sentido transversal, en algunos casos con una tendencia a la estabilización a partir de cierto punto de la sección transversal. En *Pinus patula* [30], observaron una ligera tendencia a disminuir la densidad básica desde la médula (0,470 g/cm³ - 0,330 g/cm³) hasta los 4 años de edad, para luego experimentar un ascenso continuo desde ese punto hasta las adyacencias de la corteza (0,56 g/cm³). También hay reportes donde se muestra un patrón inverso al observado en el presente estudio y se puede mencionar casos como en *Retrophyllum rospigliosii* [8], *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* [29] y *P. sylvestris* [7]. Para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, [21] y [26] señalan que el peso específico tiende a aumentar en dirección radial, pero desde el punto de vista estadístico se puede considerar que se mantiene constante a través de toda la sección transversal.

Con respecto a las diferencias entre madera temprana y madera tardía (cuadro 2, figura 2) determinadas para las muestras ubicadas en el punto medio, en el 100 % de los casos, los valores de densidad seca al aire aumentaron desde la madera temprana hacia la madera tardía con un incremento porcentual de densidad que varió entre 10,59 % y 97,97 % lo que puede representar relaciones aproximadas entre madera temprana y tardía de 1:1,1 hasta 1:2, lo cual, al compararlo con los valores señalados por [2], se acerca a lo reportado para la proporción de 1:2,5 en *Picea sitchensis* y 1:3 en *Pinus palustris* y *Pinus resinosa*, pero se diferencia notablemente de los valores de 1:5 en *Thuja plicata*. [31] reporta incrementos de grosor de paredes de traqueidas hasta de un 35 % en *Pinus caribaea* procedente de plantaciones procedentes de Uverito (Monagas, Venezuela) y esto puede ser el elemento responsable de las diferencias de densidad entre ambas zonas.

La variabilidad observada entre los valores desde la zona medular hacia la región cambial pueden tener como causa que en las adyacencias de la zona medular el anillo está constituido principalmente por madera temprana y existe una muy estrecha porción de leño tardío y muchas veces el paso de madera temprana a tardía se presenta de forma gradual. Por el contrario, hacia la zona cambial los anillos están constituidos principalmente por madera tardía y la fracción de leño temprano es muy delgada. Adicionalmente, hacia esta zona los anillos son muy estrechos y se hace difícil la separación de los mismos. En la zona adyacente al cambium, por estar representadas por anillos con una alta proporción de madera tardía, es lógico esperar mayores valores de densidad seca al aire.

En general los valores obtenidos en las diferentes posiciones de la sección transversal mostraron un comportamiento creciente desde las adyacencias de la médula hasta las adyacencias de la zona del cambium, encontrándose que, de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$), existen diferencias estadísticamente significativas entre el densidad seca al aire de la zona adyacente a la médula con respecto a las adyacencias de la zona cambial (cuadro 3). Esto indica que, desde el punto de vista de procesamiento y utilización, las zonas cercanas a la médula y al cambium van a comportarse de manera diferente y deben ser tratadas y manejadas de acuerdo a sus características; por ejemplo, si se va a utilizar la madera como material estructural se le debe dar prioridad a las porciones medias y cercanas al cambium, mientras que las porciones adyacentes a la médula se podrían destinar a usos donde no existan exigencias en cuanto a capacidad de soportar cargas. Igualmente se encontraron diferencias significativas entre la madera temprana y la madera tardía del anillo de crecimiento ubicado en el punto medio de la sección transversal, observándose que la zona de madera temprana tienen un comportamiento similar al de la posición adyacente a la médula mientras que el comportamiento de madera tardía mostró similitudes con el observado en las adyacencias de la zona cambial (cuadro 3, figura 3).

Cuadro 3. Densidad seca al aire (mínimo, promedio, desviación, máximo) en tres zonas de la sección transversal: Am (adyacencias de médula), Pm (punto medio) y Ac (adyacencias de zona cambial).

Zona	Densidad seca al aire
Am	(0,467) 0,591 ^a ±0,091 (0,731) n = 6; CV = 15,299 %
Pm (Madera temprana)	(0,403) 0,557 ^a ±0,078 (0,637) n = 6; CV = 14,101 %
Pm (Madera tardía)	(0,655) 0,806 ^b ±0,094 (0,947) n = 6; CV = 11,618 %
Ac	(0,678) 0,820 ^b ±0,091 (1,003) n = 6; CV = 12,432 %

Nota: Letras diferentes representan grupos estadísticamente diferentes de acuerdo a la prueba Tukey ($\alpha = 0,01$).

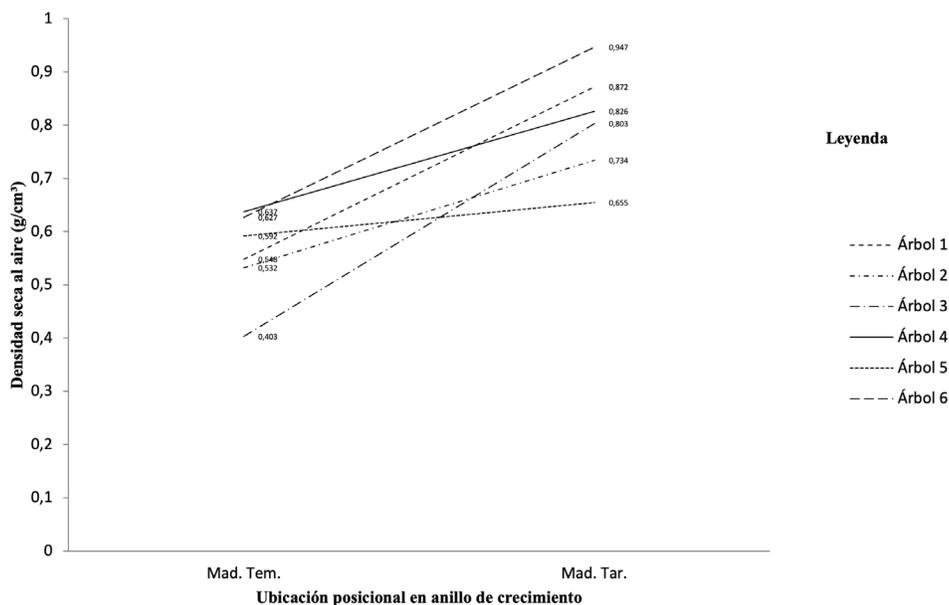


Figura 3. Variación de densidad en anillo de crecimiento (Mad. Tem. = madera temprana y Mad. Tar. = madera tardía).

Conclusiones

- Los valores de densidad seca al aire muestran un comportamiento ascendente desde las adyacencias de médula hacia las cercanías del área cambial. Este comportamiento está relacionado con la formación de anillos con baja proporción de madera tardía en la zona cercana a la médula y anillos constituidos principalmente por madera tardía en las cercanías del cambium. Las zonas de madera temprana se caracterizan por presentar traqueidas de paredes delgadas y mayor diámetro radial lo cual contrasta con el menor diámetro radial y mayor grosor de pared de las traqueidas de madera tardía, lo que se traduce en una reducción de espacios vacíos y, por consiguiente, un incremento de la densidad.
- La comparación entre madera temprana y tardía de un mismo anillo de crecimiento arrojó, de manera constante, valores mayores de densidad en la zona de madera tardía. Estos incrementos mantienen relación directa con el aumento de grosor de pared de traqueidas desde el inicio hacia el final del anillo de crecimiento.
- Los valores de densidad en el punto medio muestran un comportamiento intermedio con respecto a las cercanías de médula y zona cambial observándose que la zona de madera temprana de los anillos en la porción media muestran valores de densidad cercanos a los del anillo adyacente a la médula mientras que la zona de madera tardía presenta valores cercanos a los observados en los anillos cercanos al cambium.
- Las diferencias de densidad entre la zona adyacente a la médula y la adyacente al cambium pueden alcanzar proporciones hasta del 100 %. Tomando en consideración que la densidad es un indicativo de las propiedades de resistencia mecánica, es de esperar que las mejores propiedades de resistencia se encuentren desde el punto medio de la sección transversal hacia las adyacencias de la zona cambial y se considera que, debido al amplio uso de la especie como material de construcción, se considera que las mejores

zonas para uso estructural son desde el punto medio de la sección transversal hacia la periferia mientras que la madera de las adyacencias de médula hasta la porción media se destine a usos donde no existan altas exigencias en cuanto a propiedades de resistencia.

Recomendación

Se recomienda el estudio del peso específico seco al aire en madera temprana y madera tardía de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) W. Barret & Golfari (Pinaceae) de plantaciones de diferentes edades de plantaciones y relacionarlos con características anatómicas de las traqueidas (longitud y grosor de paredes) y proporciones de madera temprana - madera tardía del anillo de crecimiento.

Referencias

- [1] Da Silva, L., F. Ribeiro, P. Gasson & D. Cutler. (2009). *Anatomía e densidade* básica da madeira de *Caesalpinia pyramidilis* Tul. (Fabaceae), *especie endemica da catinga do Nordeste do Brasil*. Acta Botanica Brasilica 23, 436-445.
- [2] Pashin, A. & C. de Zeeuw. (1980). *Textbook in wood technology*. McGraw-Hill. Series in forest resources. New York, USA.
- [3] Arroyo, J. (2003). *Propiedades físico-mecánicas de la madera*. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales . Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela.
- [4] León H., W. (2010). *Anatomía y densidad o peso específico de la madera*. Revista Forestal Venezolana 54, 67-76.
- [5] Jozsa, L. & G. Middleton. (1994). *A discussion of wood quality attributes and their practical implications*. Forintek Canada Corp. Special Publication SP-34. Vancouver, Canada.
- [6] Rathgeber, C., V. Decoux & J. Leban. (2006). *Linking intra tree ring wood density variation and tracheid anatomical characteristics in Douglas fir* (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Annals de Forest Science 63, 699-706.
- [7] Pritzkow, C., I. Heinrich, H. Grudd & G. Helle. (2014). *Relationship between wood anatomy, tree-rings widths and wood density of Pinus sylvestris L. and climate at high latitudes in northern Sweden*. Dendrochronologia 32, 295-302.
- [8] Vásquez, A. y E. Alcántara. (2009). *Anatomía y densidad de la madera de árboles de pino romerón* (*Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C.N. *Page de ocho años de edad*. Revista Nacional de Agronomía. Medellín 62, 4869-4880.
- [9] Guzmán, Y. (1979). *Variación de algunas propiedades físicas, mecánicas y características anatómicas de Pinus caribaea Morelet, proveniente de las plantaciones de Uverito, estado Monagas* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- [10] Melandri, J. & N. Espinoza de P. (2001). *Medición del ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S2 de la pared celular con el uso del microscopio electrónico y del óptico en la especie Pinus caribaea Mor. var. hondurensis Barr*. Ediciones Fundación IFLA. Serie Madera N° 1. Mérida, Venezuela.
- [11] Trejo, E. (2006). *Determinación de la proporción de madera juvenil en la especie Pinus caribaea var. hondurensis en plantaciones de 10, 15 y 20 años (Chaguaramas Norte y Guayamure) bajo jurisdicción de la Empresa Terranova* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- [12] Rojas, A. (2016). *Estudio de variabilidad de la madera de Pinus caribaea var. hondurensis (Sénécl) W. H. Barret & Golfari (Pino Caribe) en Villanueva. Casanare, Colombia* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- [13] Reyes, E., S. Valero, Y. Molina & J. Betancourt. (2015). *Propiedades mecánicas de la madera de Pinus caribaea var. hondurensis, resinados y no resinados de las plantaciones de Uverito, estado Monagas, Venezuela*. Revista Forestal Venezolana 59, 63-75.
- [14] Reyes, E., M. Molina, S. Valero, Y. Molina & J. Betancourt. (2012). *Propiedades físicas de la madera de Pinus caribaea var. hondurensis, resinado y no resinado de las plantaciones de Uverito (Monagas, Venezuela)*. Revista Forestal Venezolana, 56, 21-28.

- [15] Ninin, P. (2006). *Efecto de reaserrado con la conicidad y curvatura sobre el rendimiento de materia prima, calidad de piezas aserradas y la trabajabilidad del pino caribe (Pinus caribaea var. hondurensis) de la orinoquia venezolana* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- [16] Mogollón, G., A. Aguilera & I. Gutiérrez. (2003). *Caracterización del pino caribe resinado proveniente de plantaciones*. Revista Forestal Venezolana 47, 107-114.
- [17] León H., W. (1990). *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de tableros de partículas de pino caribe elaborados por TABLICA* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- [18] Reyes, E. (1981). *Características de la pulpa al sulfato del Pinus caribaea var. hondurensis de 12 años de edad provenientes de las plantaciones de Cachipo, Estado Monagas* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- [19] Lombardo, C. (1980). *Comportamiento de las pulpas de pino Caribe en las batidoras Valley y PFI* (Tesis de Pregrado). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela.
- [20] Vilela, E. (1973). *Estudio tecnológico de P. caribaea var. hondurensis de 15, 10 y 5 años de edad procedente de Surinam*. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida, Venezuela.
- [21] Montero, E. & E. Reyes. (s/f). *Variación del peso específico básico de madera en 26 árboles de Pinus caribaea var. hondurensis provenientes de Uverito, estado Monagas*. Universidad de Los Andes. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- [22] Torres, Y. (2013). *Estudio de la madera de compresión de Pinus caribaea var. Hondurensis* (Tesis de Pregrado). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela.
- [23] Melandri, J., N. Dezzeo & N. Espinoza de P. 2007. *Periodicidad de los anillos de crecimiento de Pinus caribaea var. hondurensis proveniente de una plantación del estado Mérida*. Revista Forestal Venezolana 51: 57-66.
- [24] Melandri, J. (2000). *Medición del ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S2 de la pared celular con el uso del microscopio electrónico y del óptico en la especie Pinus caribaea Mor. var. hondurensis Barr* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
- [25] LABONAC- Laboratorio Nacional de Productos Forestales. (1990). *Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de pino caribe (Pinus caribaea var. hondurensis) de 10, 15 y 20 años de edad proveniente de las plantaciones de Uverito, estado Monagas*. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Mérida, Venezuela.
- [26] Araque, H. (2017). *Estudio de la densidad y peso específico en sentido radial y longitudinal en Pinus caribaea var. hondurensis de 25 años de edad, proveniente de las plantaciones de Uverito, estado Monagas* (Tesis de Pregrado). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Técnico Superior Forestal. Mérida, Venezuela.
- [27] Deutsche Industrie Normen (Normas DIN). (1988). Prüfung von Holz; Taschenbuch 31. Normen über Holz. Beuth-Verlag.
- [28] Barth, S., H. Fassola, E. Crechi, A. Keller, A. Winck, E. Figuereido & O. Knebel. (2012). *Densidad de la madera de Pinus taeda L. implantado en la zona Misiones – Noreste Corrientes, Argentina, en sentido longitudinal y transversal*. 15 Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. El Dorado, Misiones, Argentina.
- [29] Goche-Télles, J., M. Fuentes-Salinas, A. Borja-de la Rosa & H. Ramírez-Maldonado. (2000). *Variación de las propiedades físicas de la madera de un árbol de Abies religiosa y de Pinus ayacahuite var. vetchii*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 6 (1), 83-92.
- [30] Meza, D., J. Vargas, J. López, H. Vaquera & A. Borja. (2005). *Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura en Pinus patula Schl. et Cham. Ra Ximhai 1 (2), 305-324*.
- [31] Márquez C., G. (2018). *Determinación del peso específico seco al aire en madera temprana y tardía de Pinus caribaea var. hondurensis de plantaciones de 25 años de edad y su relación con algunas características de las traqueidas* (Tesis de Pregrado). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela.

Implementaciones tecnológicas en la prueba de valoración funcional y desempeño corto *Short Physical Performance Battery (SPPB)*, para el adulto mayor

Technological implementations in the functional
assessment and short performance test *Short
Physical Performance Battery (SPPB)* for the elderly

María Cristina Vargas-Del-Valle¹, Olga Sánchez-Brenes²,
Magaly Sánchez-Brenes³, Arturo Huete-Calderón⁴, Ronny Arias-Mora⁵

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2020
Fecha de aprobación: 2 de marzo de 2021

Vargas-Del-Valle, M.C; Sánchez-Brenes, O; Sánchez-Brenes, M; Huete-Calderón, A; Arias-Mora, R. Implementaciones tecnológicas en la prueba de valoración funcional y desempeño corto short physical performance battery (sppb), para el adulto mayor. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 125-138.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5206>



- 1 Laboratorio de Ergonomía Aplicada, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: crisvargasdelvalle@gmail.com
- 2 Laboratorio de Ergonomía Aplicada, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: olsanchez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4718-8552>
- 3 Laboratorio de Ergonomía Aplicada, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: msanchez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-8107-3361>
- 4 Laboratorio de Ergonomía Aplicada, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: arturohuete@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-1351-0117>
- 5 Laboratorio de Ergonomía Aplicada, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ronarias.m@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-8380-5709>

Palabras clave

Adulto mayor; batería funcional; SPPB; desempeño físico.

Resumen

El objetivo de este estudio es implementar recursos tecnológicos en el diseño de un sistema de medición para la aplicación de la prueba *Short Physical Performance Battery (SPPB)* con el fin de reducir el tiempo de aplicación y aumentar la fiabilidad de los datos. Se utilizaron metodologías de diseño de producto e innovación en dispositivos médicos para desarrollar un sistema tecnológico adecuado a las características de los involucrados en el proceso (terapeutas de rehabilitación, médicos geriatras y pacientes adultos mayores). Además, se propuso un protocolo y una metodología para implementar la prueba con el sistema de medición desarrollado en el proceso establecido por los especialistas de salud que atienden la población adulta mayor en los centros de salud costarricenses.

Abstract

The aim of this study is to implement technological resources in the design of a measurement system for the application of the Short Physical Performance Battery (SPPB) test in order to reduce the application time and increase the reliability of the measure. Product design and innovation methodologies in medical devices were used to develop a technological system appropriate to the characteristics of those involved in the process (rehabilitation therapists, geriatric doctors and elderly patients). In addition, a protocol and methodology was proposed to implement the test with the measurement system developed in the process established by health specialists who attend to the elderly population in Costa Rican health centers.

Keywords

Elderly; functional battery; SPPB; physical performance

Introducción

La longevidad es una transición natural del ser humano, sin embargo, en las últimas décadas la expectativa de vida se ha elevado. La oportunidad de llegar a cumplir 65 años aumentó de menos del 50%, a finales del siglo XIX, a más del 90% en países con alta esperanza de vida. Un reporte reciente sobre tendencias e indicadores poblacionales de las Naciones Unidas mostró que las poblaciones más longevas están creciendo en Asia Oriental y Sudoriental, así como en América Latina y el Caribe [1]. Ante esta situación, Costa Rica realiza esfuerzos [2] para que las personas mayores conserven un envejecimiento y capacidad funcional óptima. Dentro de estos esfuerzos el sistema de salud tiene a disposición hospitales especializados en geriatría y gerontología como el Hospital Dr. Raúl Blanco Cervantes (HBC), el cual cuenta con una modalidad de atención llamada Hospital de Día (HD). Esta atención se realiza durante el día para que los adultos mayores regresen a sus casas y no queden internados.

La vejez es un proceso natural del ser humano que refleja una disminución en capacidades cognitivas y físicas. Un envejecimiento saludable se caracteriza por lograr mantener la independencia y autonomía en el adulto mayor y para ello es necesario la incorporación de procesos de prevención y rehabilitación. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) [2], [3], la población costarricense que cuenta con al menos una discapacidad es el 11,77%. De esta cifra las personas mayores de 65 años reportan la discapacidad física (46%) como la segunda causa de invalidez. Esta dificultad física está expresada como la dificultad

para caminar y subir gradas. Ante esta situación, es un reto para los sistemas de salud del país y la población adulta mayor disminuir la discapacidad física como segunda causa de incapacidad en adultos mayores, la cual puede ser un factor causante de comorbilidad y/o defunciones para esta población.

En el área de la salud, la tecnología ha demostrado ser una herramienta útil para mejorar la evaluación, diagnóstico o intervención en un paciente. Algunos estudios previos han utilizado tecnología *wearable* o sensores que se colocan en el cuerpo para aumentar la efectividad en las mediciones de variables de marcha en adultos mayores. Por ejemplo, un estudio utilizó la prueba *Timed Up and Go* (TUG) para determinar si la prueba con sensores (*instrumented Timed Up and Go* o iTUG por sus siglas en inglés) tenía mayor precisión para clasificar adultos mayores sanos y que habían tenido el síndrome de caída [4]. Sin embargo, se concluyó que no se obtuvieron resultados significativos entre las mediciones tradicionales y con sensores. Otros estudios han utilizado tecnología más sofisticada y han obtenido resultados exitosos acerca de la utilización de la tecnología para estas pruebas de valoración funcional [5], [6], [7], [8]. Sin embargo, el uso y la aceptación de este tipo de tecnología entre los especialistas es un poco reservada.

Una de las intenciones en el uso de tecnología en el sector de salud es brindar un mejor servicio a los pacientes y facilitar la labor de los especialistas en su rutina diaria. Sin embargo, muchas tecnologías que deberían reducir los errores se han dejado de usar debido a problemas organizacionales (falta de tiempo, disponibilidad o apoyo en la gestión), por su diseño (usabilidad, funcionalidad), su impacto en el flujo de trabajo, factores éticos y sociales o, incluso, falta de conocimiento y habilidades necesarias para aplicar los instrumentos de medición [9], [10] [11]. La investigación en ingeniería de factores humanos ha demostrado que la forma en la que se implementan las tecnologías también debe diseñarse cuidadosamente para obtener beneficios y una inserción exitosa en el contexto para el que fue diseñado [12], [13].

Algunos esfuerzos realizados dentro de instituciones y organizaciones que velan por una mejor implementación de tecnologías en ambientes de la salud, han combinado la gestión, la ingeniería y las leyes para desarrollar metodologías que favorezcan su uso. Es el caso de la agencia de Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA por sus siglas en inglés) la cual regula, entre otras cosas, la manufactura de dispositivos médicos. Dentro de este marco, la implementación efectiva de la tecnología, por medio de un dispositivo médico, requiere de garantizar las buenas prácticas a través del control de la calidad en el diseño y el proceso de inserción. Este proceso conlleva etapas de planeación, entrada y salida de recursos, revisión, verificación, iteración en el diseño, validación y registro, entre otros. [14]. Otro ejemplo es la Universidad de Stanford, que desarrolló un proceso estructurado de innovación para el diseño e implementación de tecnología médica. Este proceso está conformado por tres etapas (identificar, inventar e implementar), las cuales utilizan enfoques de resolución de problemas como la exploración de necesidades, generación de conceptos, verificación y validación, así como la generación de modelos de negocio y lanzamiento de producto [15]. Comprender la manera más adecuada para hacer uso eficiente de la tecnología al servicio de un envejecimiento saludable es valioso.

Este estudio muestra el diseño de un sistema de medición que apoya la labor de los especialistas geriátricos al aplicar la prueba *Short Physical Performance Battery* (SPPB) para conocer el desempeño funcional del adulto mayor. La prueba SPPB consta de tres subpruebas que miden variables de fuerza de piernas, equilibrio y velocidad de marcha. Es una prueba de *screening* o diagnóstico rápido para establecer, junto a otras evaluaciones, el estado de fragilidad de un adulto mayor, por medio de la sumatoria del puntaje obtenido en cada subprueba de acuerdo a una escala de tiempo. La fragilidad se relaciona con la discapacidad, comorbilidad y eventos adversos como la muerte por lo que aplicar esta prueba es una manera de detectar,

clasificar y planificar las intervenciones adecuadas al paciente. Como todas las pruebas de desempeño corto, la SPPB se aplica de manera manual con la única ayuda de un cronómetro digital comúnmente utilizado en un reloj de pulsera o en el teléfono celular. Por medio de las observaciones y entrevistas se establecieron varios factores que afectan la aplicación de la prueba y los puntajes en cada subprueba y, por lo tanto, la clasificación del adulto mayor en un estado específico de fragilidad. Esto genera incertidumbre en la fiabilidad de los datos e impacta directamente en el estado físico real del paciente. Además, dichos factores influyen en el tiempo de aplicación de la prueba y perjudica el tiempo de consulta destinado para cada paciente de 30 minutos. Es por esta razón que se identifica la oportunidad de implementar recursos tecnológicos para mejorar el tiempo de aplicación de la prueba y la fiabilidad de los datos, por medio del diseño de un sistema de medición, un protocolo para la aplicación de la prueba y una propuesta metodológica para implementarla en centros de rehabilitación.

Para realizar la prueba de equilibrio el paciente debe colocarse en bipedestación con los pies en tres posiciones secuenciales (pies paralelos, semitándem y tándem). El paciente debe mantener el equilibrio por 10 segundos en cada posición para obtener un valor máximo de 4 puntos. La prueba de velocidad de marcha mide el tiempo que tarda el adulto mayor en recorrer a ritmo normal una distancia de 4 o 6 metros. Dependiendo de los segundos de duración, se le asigna un puntaje en un rango de 1 a 4 puntos. La tercera prueba mide el tiempo que tarda el paciente en levantarse y sentarse, 5 veces consecutivas, en una silla con los brazos cruzados y realizando dichas repeticiones lo más rápido posible. El puntaje asignado va de 1 a 4 puntos dependiendo de los segundos de duración. Al final del proceso se suman los puntajes de las 3 pruebas y el resultado determina el estado en que se encuentra el adulto mayor. Un puntaje menor a 10 implica un criterio de fragilidad, entre discapacidad, pre fragilidad o fragilidad [16] [17]. Esto le permite al especialista poder realizarla intervención adecuada y asignarle una rehabilitación que se adecúe al criterio de fragilidad establecido.

Metodología

En este estudio se desarrollaron tres etapas (figura 1). Para este proceso se utilizó como referencia la metodología de Diseño y desarrollo de producto de Ulrich y Eppinger [18], cuyo enfoque integral para el proceso de desarrollo de productos facilita la resolución de problemas y toma de decisiones. Además, se consultó la metodología de Biodiseño [15] para la creación de tecnologías médicas, la cual tiene un enfoque de innovación en productos y servicios utilizando equipos interdisciplinarios para su identificación, ideación e implementación en entornos de salud.

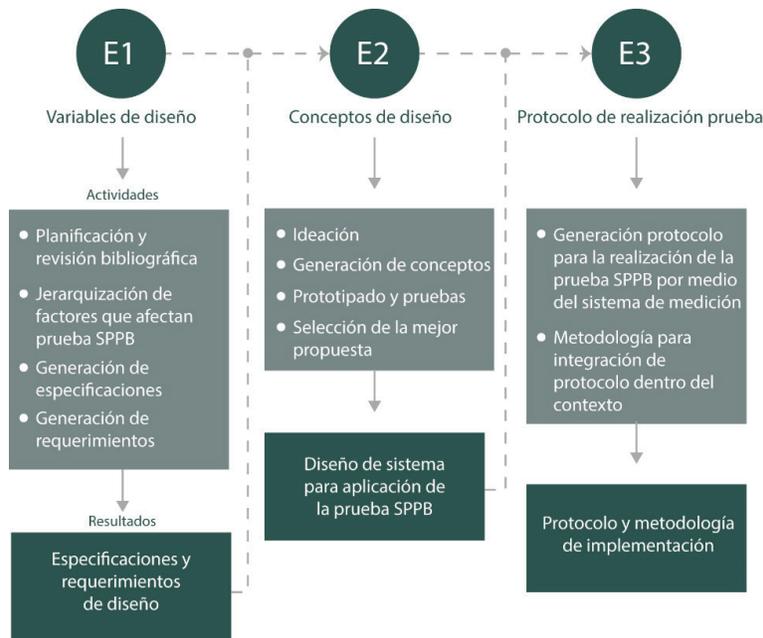


Figura 1. Esquema metodológico del proyecto.

Resultados

De acuerdo al problema planteado de poca fiabilidad de los datos y tiempos de aplicación de la prueba y después de un análisis de puntos críticos para cada sub prueba con el fin de definir los principales reprocesos en la aplicación de la prueba SPPB, se establecieron las causas y sus efectos respectivos (cuadro 1).

Junto con los expertos y realizando un trabajo iterativo de observación y discusión, se definieron importancias relativas para cada factor con el fin de asignar prioridades en el diseño del sistema. El resultado es una valoración numérica subjetiva de importancia para satisfacer las necesidades del especialista. La escala se divide en tres niveles: 1. Abordar esa causa no mejora la aplicación de la prueba, 2. Sería bueno abordar esa causa y 3. Abordar la causa es crítico para mejorar la aplicación de la prueba. Los que tienen la mayor importancia son el tipo de paciente, el procedimiento para realizar la prueba, el diseño de registro y base de datos, la herramienta de medición e instalación de materiales. Los especialistas consideraron que abordar estos factores podría aumentar la fiabilidad de los datos y reducir el tiempo de aplicación de la prueba. Como segunda importancia relativa están la experiencia del especialista que aplica la prueba, la comunicación hacia el adulto mayor antes y durante la prueba, el proceso, el tiempo de consulta y el espacio designado. Estos factores son deseables de abordar, pero no son determinantes para mejorar la aplicación de la prueba y reducir la desconfianza de los datos. El resto de factores son dependientes de terceros y en los cuales los especialistas no pueden tener control (importancia relativa de 1).

Cuadro 1. Causas, efectos y su importancia relativa de acuerdo a los especialistas.

Causa	Sub causas	Efecto	Problema asociado	Importancia relativa
Persona	Falta de organización	Momento inadecuado para aplicar la prueba de velocidad debido a ocupación del pasillo	Aumento en el tiempo de aplicación	1
	Comunicación inadecuada	A veces las instrucciones no quedan claras para el adulto mayor	Aumento en el tiempo de aplicación	2
	Tipo de entrenamiento	Manera de interactuar con el paciente que facilita o no el procedimiento de la prueba	Aumento en el tiempo de aplicación	1
	Experiencia del especialista	La aplicación de la prueba depende del <i>konw how</i> del especialista	Poca fiabilidad de los datos y aumento en el tiempo de aplicación	2
	Tipo de paciente	El especialista dura más dependiendo de las características físicas y cognitivas del paciente	Aumento en el tiempo de aplicación	3
Método	Procedimiento	Tiempos de reacción diferentes (médicos y fisioterapeutas), uso inadecuado del cronómetro y registro de datos de manera diferente entre especialistas	Poca fiabilidad de los datos y aumento en el tiempo de aplicación	3
	Proceso no estandarizado	Descontrol en las actividades durante la prueba (desde la colocación de materiales hasta el registro de datos)	Poca fiabilidad de los datos y aumento en el tiempo de aplicación	2
Instrumento	Diseño de la prueba	Sistema de registro y visualización manuales (operador dependiente)	Poca fiabilidad de los datos	3
	Tipo de tecnología	Toma de tiempos poco precisos por el tipo de cronómetro utilizando (reloj digital o celular)	Poca fiabilidad de los datos	3
	Tipo de materiales de apoyo	Materiales de apoyo para la prueba (marcas en el piso) y colocación (de las marcas y la silla) son manipuladas por terceros	Aumento en el tiempo de aplicación	3
	Frecuencia de mantenimiento	Líneas de posiciones se desprenden con facilidad	Aumento en el tiempo de aplicación	1
Entorno	Tiempo limitado	Aplicación de la prueba con descuido por la limitante de tiempo en la consulta	Poca fiabilidad de los datos	2
	Falta de señalización	Incertidumbre en el adulto mayor cuando especialista señala líneas de posición en la prueba y recibe instrucciones al mismo tiempo	Aumento en el tiempo de aplicación	1
	Falta de espacio	Poco espacio obliga a traslados para aplicar prueba de velocidad	Aumento en el tiempo de aplicación	2

Las causas a mejorar requieren de variables de diseño para saber cómo manejar las necesidades del usuario. Para ello se establecen requerimientos y, por lo tanto, especificaciones de diseño las cuales se vuelven métricas a seguir y requisitos que no pueden faltar en el sistema. El cuadro 2 muestra, de acuerdo a los factores e importancias relativas, los requerimientos y las características ingenieriles para el sistema de medición. El diseño tiene como prioridad establecer un sistema que incluya las características físicas y cognitivas de los adultos mayores que sean aptos para realizarla la prueba.

Cuadro 2. Requerimientos y especificaciones asociadas al factor.

Factor	Requerimientos	Especificaciones
Organización	Uso eficiente de los recursos (espacio, personal, materiales, entre otros)	Estrategia colaborativa e interdisciplinar
Comunicación	Comunicar con claridad al paciente	Indicaciones específicas y mínimas en la prueba
Entrenamiento	Posiciones de seguridad mínimas hacia el paciente durante la prueba	Capacitaciones y actualizaciones
Experiencia	Agilidad del especialista en la aplicación de la prueba	Capacitaciones y actualizaciones
Tipo de paciente	El especialista debe aplicar la prueba al paciente apto para realizar, independientemente de su estado físico y cognitivo	Facilidad de aplicación, con poca carga cognitiva y esfuerzo físico necesario
Procedimiento	Protocolo de aplicación	Pautas más detalladas para guiar el procedimiento
Proceso	Control en las actividades del proceso	Estandarización del proceso
Diseño	Sistemas de registro y visualización de datos fáciles de utilizar	Interfaces intuitivas, elementos ergonómicos y no distractores
Tecnología	Tecnología confiable y precisa	Registro automático
Materiales de apoyo	Facilidad de instalación, no debe generar ningún riesgo de caídas ni lesiones	Tiempo mínimo para colocar el sistema, superficies lisas y antideslizantes
Mantenimiento	Facilidad de mantenimiento, durabilidad en sus materiales	Materiales livianos e impermeables, que soporten productos de limpieza
Tiempo	Rapidez en su aplicación	Cantidad de pasos de ejecución
Señalización	Señalización visual y táctil	Elementos visibles, contrastantes e identificables
Espacio	Área exclusiva para la prueba	Área mínima

Esto quiere decir que, el especialista debe de aplicar la prueba con facilidad, sin ninguna sobrecarga de información o distracción causada por información innecesaria. Además, el sistema deber contar con un protocolo detallado del procedimiento para evitar incurrir en el mal uso del instrumento de medición, evitar tiempos de reacción que perjudiquen la medición o datos con un registro incorrecto. Para ello el sistema de registro y visualización de datos debe ser intuitivo y que no le demande al especialista mayor intervención. Adicional a este requisito, el sistema debe permitir un acceso a la información posterior a la prueba con el fin de observar la evolución del estado físico del paciente. La tecnología que se implemente para la medición del tiempo debe restringir el error humano y el tiempo de reacción del especialista. Un registro automático permite que el especialista solo se preocupe por la seguridad del paciente durante la prueba. Finalmente, los materiales que apoyen la prueba deben ser seguros para el paciente y de fácil colocación, al mismo tiempo que impidan la manipulación por terceros antes o durante la prueba. Los requerimientos de segundo y tercer nivel están detallados en el cuadro 2.

Desarrollo de conceptos y propuestas de diseño

Se realizó un análisis de las tecnologías existentes en el mercado que puedan realizar mediciones cinéticas y cinemáticas, con el fin de facilitar la toma de datos en un tiempo determinado. Se puede observar en la tabla 3 un resumen de las tecnologías propuestas, así como sus ventajas y desventajas. La selección y conveniencia del tipo de tecnología a desarrollar se estableció de acuerdo a las necesidades, requerimientos y especificaciones planteadas, es por esta razón que se seleccionaron los sistemas de tapiz instrumentado y plataforma de fuerza con la utilización de sensores y actuadores para el diseño del sistema de

medición. El factor tipo de paciente descartó las tecnologías que deben colocar o ajustar algún elemento al adulto mayor (plantillas instrumentadas, cámaras de video y electromiografía). Esto para resguardar la seguridad del adulto mayor (posibles lesiones sobre la piel) y evitar que los elementos puedan caerse por un mal ajuste. Finalmente, el registro electrónico, si bien es una opción tecnológica que viene incorporada con algunos de estos sistemas, la opción de diseñar y proponer una mejor visualización de datos generales y estadísticos, así como la conexión con otros programas utilizados por los sistemas de salud (EDUS o privados) es de considerar separadamente.

Una vez seleccionadas las tecnologías con las cuales trabajar, se utilizaron procesos de generación de conceptos e ideación [18, 15] con los cuales se definieron tres conceptos de diseño. Las ventajas y desventajas se compararon con respecto a los requerimientos y especificaciones.

Se creó una matriz de toma de decisión en donde se multiplicó el valor de la importancia relativa de cada requerimiento por un valor percibido de cumplimiento entre el sistema y dicho factor (del 1 al 10 en donde 10 es cumplimiento total del requerimiento). El prototipo del concepto seleccionado fue probado con la ayuda de la Asociación Cartaginesa de Atención a Ciudadanos de la Tercera Edad (ASCATE), un centro diurno modelo el cual cuenta con más de 100 adultos mayores a su cuidado. Durante la prueba de verificación, el sistema tuvo varias observaciones: el material utilizado puede generar tropiezos, los botones de accionamiento deben ser más grandes porque no contemplan el movimiento del especialista, es importante incorporar una señal de aviso cuando una prueba se termina, los módulos de equilibrio deben tener demarcaciones más llamativas. La prueba de funcionalidad de la tecnología arrojó que los sensores de presión deben colocarse en mayor número por área, se debe mejorar el rango de detección de movimiento para el módulo de velocidad y se debe de mejorar el área de colocación de la computadora portátil que almacena y muestra los datos.

Después de estas conclusiones con el primer prototipo, se volvió a realizar el proceso de diseño pensando también en la estandarización de piezas. El resultado conceptual es un sistema tecnológico que puede medir, en las tres sub pruebas, los tiempos de aplicación automáticamente sin la necesidad de utilizar otra herramienta (su teléfono celular o un reloj digital). El diseño seleccionado (figura 2) consta de dos subsistemas principales: medición y registro (cuadro 4). El sistema de medición se divide en dos módulos. El primero se encarga de detectar señales de presión para medir el tiempo en la prueba de equilibrio y la prueba de levantarse de la silla por medio de un tapiz instrumentado que utiliza sensores de fuerza resistivos. Este módulo (figura 3) cuenta con un espacio para colocar las patas delanteras de la silla y así poder sujetarla al tapete. Además, tiene un accesorio el cual se coloca en las patas traseras de la silla, estabilizándola cuando el paciente se sienta. Este módulo de tapete está configurado para que las posiciones de los pies en la prueba de balance y levantarse de la silla sean intuitivas y fáciles de comunicar para el especialista, solamente es necesario indicar el color en el que se debe posicionar y es más sencillo para el adulto mayor seguir las instrucciones. Cuenta con botones para que el especialista pueda accionar el cronómetro con el pie (inicio y reinicio). No es necesario que el especialista detenga la prueba pues si el paciente se desbalancea, el sensor lo detecta inmediatamente y capta el tiempo en el que estuvo en equilibrio. Por medio de una indicación auditiva de baja carga cognitiva, el especialista sabrá cuándo el sistema ha terminado de contar el tiempo. El segundo módulo de medición se encarga de captar el movimiento de inicio y final durante el recorrido por medio de sensores de movimiento. El especialista, por medio del software indica que quiere pasar de prueba y activa los sensores de movimiento al pulsar el botón de inicio, una vez que el paciente pase por el primer sensor, el programa iniciará el conteo del tiempo hasta que pase cerca del segundo sensor de movimiento al final del recorrido. El sistema avisará cuando esté listo para iniciar el segundo intento y el adulto mayor iniciará el recorrido junto al especialista.

Cuadro 3. Tecnologías y su funcionamiento en cada prueba. Ventajas y desventajas de las mismas.

Tecnología	Funcionamiento en la prueba			Ventajas	Desventajas
	Equilibrio	Marcha	Levantarse de la silla		
<p>Tapiz instrumentado</p> <p>Permite medir fuerzas que ejerce el apoyo del paciente sobre la superficie durante algún movimiento.</p>	<p>Detección de cierta cantidad de presión en la planta del pie sobre la superficie. Esto se programa con datos previos como el peso del paciente.</p>	<p>Detección en la variación de fuerza (presión) ejercida sobre la superficie al inicio y final.</p>	<p>Detección de la presión en la planta del pie sobre la superficie.</p>	<p>Portabilidad</p> <p>Fácil de almacenar</p> <p>No es intrusivo</p>	<p>No toman en cuenta dirección ni componentes del vector de la fuerza por lo que se pierde cierta información.</p> <p>Dependiendo de su tamaño, toma tiempo colocarlo.</p>
<p>Plataformas de fuerza</p> <p>Permite medir fuerzas que ejerce el apoyo del paciente sobre la superficie durante algún movimiento.</p>	<p>Detección en el cambio en la posición del centro de gravedad.</p>	<p>Variación de fuerza ejercida sobre la superficie al inicio y final</p>	<p>Detección en la variación de fuerza ejercida al levantarse y sentarse.</p>	<p>Compatibles con otros tipos de medición (cámaras, electromiografía)</p> <p>Medición más precisa</p>	<p>Muy pesadas (mínimo 8kg).</p> <p>Es necesario poner por lo menos 2 para la prueba de marcha.</p> <p>Es necesario empotrarlas al piso.</p> <p>Más costosas.</p>
<p>Plantillas instrumentadas</p> <p>Permite el registro de presiones y su distribución en la planta del pie.</p>	<p>Funcionan como el tapiz instrumentado, con la detección de presión sobre la planta del pie.</p>	<p>Detección en la variación de fuerza (presión) ejercida sobre el pie. En esta prueba es necesario establecer un inicio y un final de la prueba.</p>	<p>Detección de la presión en la planta del pie sobre la superficie.</p>	<p>Portabilidad</p> <p>Fácil de colocar</p> <p>Fácil de almacenar</p>	<p>Es necesario el suministro de las pastillas al tiempo.</p> <p>Tecnología intrusiva (tiene contacto directo con varias partes del cuerpo).</p> <p>Interfiere con movimientos normales para el paciente.</p> <p>El paciente debe colocarse el equipo antes de la prueba y calibrarlo.</p>
<p>Cámaras de video</p> <p>Por visión artificial se identifican los movimientos del paciente para reconstrucción en medio digital y análisis cinemático y tiempo espacial.</p>	<p>Detección en el cambio en la posición del centro de gravedad. En este caso los marcadores establecen las dimensiones del cuerpo, pero es necesario utilizar una plataforma de fuerza.</p>	<p>Detección en el cambio de movimiento de un punto inicial y un punto final.</p>	<p>Detección en el cambio de movimiento de un punto inicial y un punto final.</p>	<p>Mayor precisión en las mediciones</p> <p>Instalación en lugares altos y no interrumpa el paso.</p>	<p>Tecnología intrusiva (es necesaria la colocación de marcadores anatómicos) podría interferir con movimientos normales del paciente.</p> <p>Equipo costoso.</p> <p>Software necesita actualización que implica un costo.</p>
<p>Sensores y actuadores</p> <p>Están presentes en las tecnologías descritas anteriormente. La diferencia es la personalización si se utilizan individualmente como componentes.</p>	<p>Detección de cierta cantidad de fuerza sobre una superficie, por medio de sensores de presión.</p>	<p>Detección en el cambio de movimiento de un punto inicial y un punto final, por medio de sensores de detección de movimiento.</p>	<p>Detección de cierta cantidad de presión ejercida por los pies, por medio de sensores de presión.</p>	<p>Portátiles.</p> <p>De fácil instalación.</p> <p>Disponibilidad en el mercado de diferentes tipos de sensores.</p> <p>Se pueden adaptar diseños diferentes.</p>	<p>Es necesario utilizar varios para generar un sistema de medición.</p> <p>Es necesario hacer pruebas de funcionamiento para cada tipo de sensor para conocer su capacidad real y el cumplimiento de las especificaciones.</p>
<p>Electromiografía</p> <p>Permite el registro de actividad eléctrica del músculo en movimiento.</p>	<p>Detección de cantidad de activación muscular para ambos lados del cuerpo durante el equilibrio.</p>	<p>Es necesaria la utilización de otras tecnologías que apoyen la medición del recorrido.</p>	<p>Detección de cantidad de activación muscular de acuerdo a la fuerza ejercida para levantarse.</p>	<p>Medición de cuánta actividad está siendo realizada por el músculo, esto podría dar una mayor visión al especialista de qué músculos están utilizando los pacientes.</p>	<p>Tecnología intrusiva (se deben colocar electrodos sobre la piel).</p> <p>Equipo costoso con actualizaciones que deben ser costeadas.</p> <p>Medición depende de la correcta colocación de los electrodos.</p> <p>Por el tipo de paciente, la piel del adulto mayor podría verse afectada.</p> <p>Interfiere con movimientos normales para el paciente.</p> <p>Se deben sustituir suministros al tiempo.</p>
<p>Registro electrónico</p> <p>Por medio de software.</p>	<p>Para las tres pruebas de registro de los datos se realiza una vez la tecnología capte la señal determinada. Eso permite una captura y cálculo de puntajes de manera inmediata así como una visualización de datos en tiempo real.</p>			<p>Medición y registro inmediatos.</p> <p>Visualización inmediata.</p> <p>Generación de base de datos del paciente con todas las pruebas aplicadas.</p> <p>Posibilidad de generar estadísticas a los datos.</p>	<p>Inversión en el diseño de software y visualización de datos.</p> <p>Inversión en actualizaciones de software.</p> <p>Soporte técnico necesario.</p> <p>Capacitación en el uso del software.</p>

Después de realizar la verificación funcional del prototipo, se decidió prescindir del tapete de 4 metros que guiaba el recorrido, pues se vio el riesgo de caída o lesiones al caminar sobre el mismo. En esta propuesta se plantea la instalación de los sensores de movimiento en una pared, con lo que se asegura la poca manipulación de los mismos, el correcto ajuste del sensor en la distancia apropiada para el funcionamiento, la disminución de pasos en la colocación del sistema posibles tropiezos con los componentes. El subsistema de registro se encarga de recibir, interpretar y mostrar los tiempos obtenidos de cada sensor y, por lo tanto, el puntaje final para la prueba. Tanto el sistema computacional como la visualización de datos deben ser diseñados. Estos dos subsistemas, de medición y registro, eliminan el problema de tiempos de reacción o errores humanos a la hora de medir el tiempo, así como el registro de los datos de la prueba. Aumentando la fiabilidad de los datos y disminuyendo actividades que generan reprocesos. Una vez que las pruebas terminen, el fisioterapeuta o geriatra cuentan con la información necesaria para continuar con la evaluación del adulto mayor.

Otros sistemas incluyen el almacenamiento del equipo, el cual sirve como protección para guardar el tapete instrumentado y accesorios (tope de seguridad para la silla y cargador del tapete) y como apoyo para la computadora o tablet que brinda el control para elegir las pruebas y visualizar los datos en tiempo real. Los elementos de señalización permiten mostrar con facilidad al adulto mayor las áreas en donde tiene que posicionarse y el camino a recorrer. Además, le da facilidad al especialista para dar las indicaciones al referirse a los elementos visuales de posición, distancia y uso del sistema. La señal auditiva, permite conocer la finalización del cronómetro entre pruebas. Los subsistemas de ajuste y sujeción son diseñados de manera que sean fáciles de manipular (el tapete hacia diferentes formas de sillas) y se puedan sustituir en caso de necesitarlo (elementos estándares como tornillos, canaletas, etc).

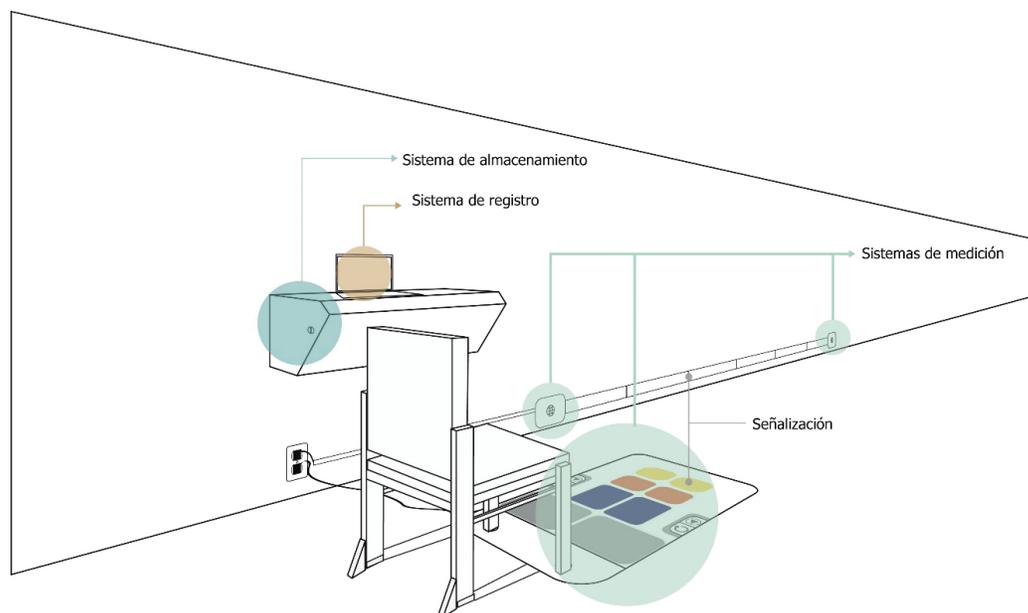


Figura 2. Esquema del sistema de medición propuesto.

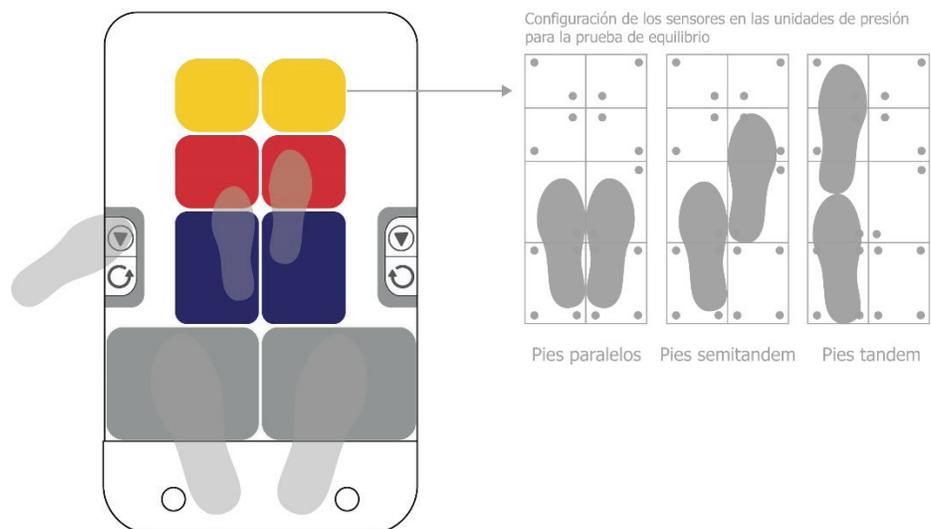


Figura 3. Módulo de medición de presión para la prueba de balance y levantarse de la silla.

Cuadro 4. Subsistemas, componentes y funciones en relación con el tipo de prueba.

Subsistema	Componentes	Función	Relación con prueba
Medición	Módulos de presión	Recibir señales de fuerza (peso) del paciente.	1. Prueba de equilibrio
	Módulos de detección de movimiento	Recibir señales de movimiento del paciente.	2. Prueba de levantarse de la silla 3. Prueba de velocidad de marcha
Registro	Software	Interpretar señales recibidas en términos de tiempo y estadística.	1,2,3
	Diseño de interfaz	Mostrar al usuario los datos de manera eficiente para que pueda interpretarlo y tomar decisiones importantes.	1,2,3
Almacenamiento	Módulo de almacenamiento	Proteger el equipo de factores externos (temperatura, humedad, luz, suciedad, etc.) Brindar soporte para equipo necesario (computadora portátil o tablet).	1,2
	Protectores de cableado	Brindar protección y seguridad al cableado de componentes eléctricos y de energía.	3
Señalización	Posición	Facilitar la comprensión del paciente de las posiciones que debe realizar.	1,2
	Distancia	Mostrar al paciente el recorrido que debe realizar	
	Uso	Facilitar el uso del dispositivo al especialista	3
	Auditivos	Indicar al especialista la finalización o inicio de pruebas	1,2,3
Ajuste y sujeción	Ajuste hacia la silla	Ajustar y asegurar la silla al módulo de presión.	2
	Sujeción mecánica de partes	Brindar sujeción de los componentes en las instalaciones de rehabilitación de manera que no implique un obstáculo.	3
Seguridad	Topes de silla	Estabilizar la silla para evitar que desplace hacia atrás.	2
	Cierre del equipo	Brindar acceso restringido al equipo.	1,2

Protocolo

El uso de tecnología en un proceso de valoración funcional no es común dentro de la práctica geriátrica. Es por ello, que al implementar recursos tecnológicos dentro de una prueba de desempeño físico aplicada de manera manual es necesario establecer pautas e instrucciones para que la aplicación de la prueba SPPB, por medio del sistema de medición en centros de salud como el HBC, sea efectiva. Para realizar el protocolo de incorporación tecnológica se utilizaron como referencia diagramas de flujo que permitieron observar y analizar la aplicación de la prueba con el uso de la tecnología se pudo comprobar la eliminación de reprocesos con respecto a la aplicación actual como la explicación inicial de las posturas, recolocación del adulto mayor en el espacio, finalización de cronómetros, registro de puntajes o errores en la medida por tiempos de reacción lenta y uso del cronómetro. Actividades que son sustituidas o mejoradas por la tecnología. Otro beneficio del sistema es la aplicación de la prueba en un solo lugar, lo que elimina traslados a otros espacios (para aplicar la prueba de velocidad).

Dentro de los primeros pasos del protocolo (cuadro 5) está una inspección al lugar para conocer el contexto en donde se instalará el sistema de medición, si el lugar no cuenta con ciertos requisitos es necesario analizar la posibilidad de ajustar el sistema. Los requisitos con los que debe de contar el centro de salud para poder implementar el sistema son: destinar un lugar con más de cuatro metros de largo para ubicar el sistema. Es preferible que no sea un pasillo de emergencia sino un espacio que se pueda utilizar por un tiempo corto mientras se aplica la prueba. No debe ser un espacio en donde terceros puedan ocupar con facilidad los elementos (una entrada o salida del edificio). Es necesario utilizar una silla cerca y exclusiva para el uso de la prueba. Los sensores de movimiento deben ser instalados en la pared, a una altura máxima de 10 cm del suelo, esto se debe a que la distancia de sensado debe de identificar la parte baja de la pierna del paciente. El sistema de almacenamiento cuenta con un cierre de seguridad con lo que es necesario asignar responsables para tener acceso al módulo de presión. Para el uso del sistema, es necesario contemplar ciertas actividades (figura 4) que permitan el buen funcionamiento del mismo.

Cuadro 5. Protocolo de implementación con responsables.

	Pasos	Descripción	Responsables
1	Coordinar diseño con ErgoTEC	El centro de salud debe coordinar el diseño y la implementación del sistema con el laboratorio. Ya que es un producto personalizado, es necesario entender las necesidades del lugar.	Departamento de rehabilitación del centro o administración del centro.
2	Inspección	El equipo del laboratorio debe realizar una inspección del lugar para identificar recursos disponibles del lugar (espacio, infraestructura, capacidad de atención, etc.) y así modificar el diseño al centro.	Persona encargada de la vista guiada. ErgoTEC
3	Modificaciones del lugar y compra de materiales de apoyo	El centro debe realizar las modificaciones al espacio pertinentes (reacomodar espacio, hacer compra de materiales de apoyo como sillas, computadoras o tablets para el sistema, etc.)	Administración del centro
4	Instalación y pruebas	El laboratorio se encarga de la instalación del sistema (físico y software) y realiza pruebas para verificar el correcto funcionamiento de los elementos.	Equipo de ErgoTEC
5	Capacitación	Una vez instalado el sistema de medición, es necesario la capacitación del personal que utilizará la tecnología.	Equipo de ErgoTEC
6	Acompañamiento	El laboratorio se mantiene en contacto con el centro para cualquier eventualidad y para supervisar el correcto uso del sistema.	Equipo de ErgoTEC

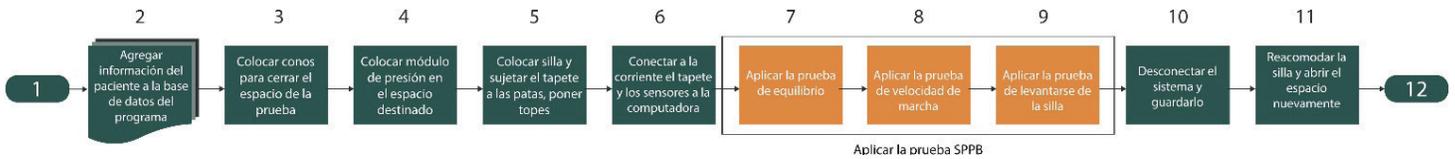


Figura 4. Pasos a contemplar para el uso del sistema de medición.

Conclusiones

La aplicación de la tecnología para procesos de valoración funcional en el adulto mayor trae ventajas y beneficios tanto para el especialista como para el adulto mayor. El sistema desarrollado en este estudio mejora la fiabilidad de los datos obtenidos en la prueba SPPB al utilizar mediciones de tiempo detectadas inmediatamente. Además, este sistema reduce el tiempo de aplicación al establecer un protocolo de uso y estandarizar el proceso. Por medio del planteamiento de un protocolo, la tecnología tiene mayor posibilidad de aceptación por parte de los profesionales y permiten un mayor control en el proceso de valoración del adulto mayor y una mejora en el registro.

La aplicación de tecnología abre nuevas posibilidades en los centros de salud para realizar valoraciones más exactas, reducir retrabajos en los procedimientos y permitirle al especialista cuidar de la seguridad del paciente mientras realiza la prueba. Además, el sistema abre la oportunidad de validar la prueba SPPB en el país con población costarricense, ya que los tiempos definidos en el test son establecidos con poblaciones europeas y norteamericanas.

Referencias

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, «World Population Ageing 2019 Highlights,» New York, 2019.
- [2] Ministerio de Salud, Dirección de Planificación Estratégica y evaluación de las acciones en salud, «Estrategia Nacional para un envejecimiento saludable basado en el curso de vida 2018-2020,» San José. Costa Rica, 2018.
- [3] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, «INEC COSTA RICA,» 2011. [En línea]. Available: https://www.inec.cr/estadisticas?keys=discapacidad&fuente_tid=157&field_periodo_tid=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=2011. [Último acceso: 09 2019].
- [4] K. S. R. B. K. Jackson, «Use of an Instrumented Timed Up and Go (iTUG) for Fall Risk Classification,» *PHYSICAL & OCCUPATIONAL THERAPY IN GERIATRICS*, 2018.
- [5] J. Beyea, C. McGibbon, A. Sexton, J. Noble y C. O'Connell, «Convergent Validity of a Wearable Sensor System for Measuring Sub-Task Performance during the Timed Up-and-Go Test,» vol. 17, n° 934, 2017.
- [6] S. Negrini, M. Serpelloni, C. Amici, M. Gobbo, C. Silvestro, R. Buraschi, A. Borboni, D. Crovato y N. Lopomo, «Use of Wearable Inertial Sensor in the Assessment of Timed-Up-and-Go Test: Influence of Device Placement on Temporal Variable Estimation,» *Wireless Mobile Communication and Healthcare. 6th International Conference, MobiHealth 2016, Milan, Italy, November 14-16, 2016, Proceedings*, 2017.
- [7] A. Salarian, F. Horak, C. Zampieri, P. Carlson-Kuhta, J. Nutt y K. Aminian, «iTUG, a Sensitive and Reliable Measure of Mobility,» *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING*, vol. 18, n° 3, 2010.
- [8] G. Sprint, D. Cook y D. L. Fellow, «Toward Automating Clinical Assessments: A Survey of the Timed Up and Go,» *IEEE REVIEWS IN BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. 8, 2015.
- [9] T. Braun, A. Rieckmann, F. Weber y C. Grüneberg, «Current use of measurement instruments by physiotherapists working in Germany: a cross-sectional online survey,» *BMC Health Services Research*, vol. 18, n° 1, p. 810, 2018.
- [10] M. Karunanithi, «Monitoring technology for the elderly patient,» *Expert Review of Medical Devices*, vol. 4, n° 2, pp. 267-277, 2007.



- [11] R. Swinkels, R. Van Peppen, H. Wittink, J. Custers y A. Beurskens, «Current use and barriers and facilitators for implementation of standardised measures in physical therapy in the Netherlands.,» *BMC Musculoskeletal Disorders*, vol. 12, 2011.
- [12] A. VOGELSMEIER, J. HALBESLEBEN y J. SCOOT-CAWIEZELL, «Technology Implementation and Workarounds in the Nursing Home,» *Journal of the American Medical Informatic Association*, vol. 15, nº 1, p. 114–119, 2008.
- [13] B.-T. Karsh, «Beyond usability: designing effective technology implementation systems to promote patient safety,» *Quality and Safety in Health Care Journal*, vol. 13, pp. 388-394, 2004.
- [14] Office of Medical Products and Tobacco, Center for Devices and Radiological Health, FDA, «DESIGN CONTROL GUIDANCE FOR MEDICAL DEVICE MANUFACTURERS,» 11 March 1997. [En línea]. Available: <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/design-control-guidance-medical-device-manufacturers>. [Último acceso: 2019].
- [15] P. Yock, S. Zenios, J. Makower, J. Brinton, U. Kumar, L. Denend y T. M. Krummel, *Biodesign: The Process of Innovating Medical Technologies*, Segunda ed., Cambridge University Press, 2015.
- [16] J. Guralnik, E. Simonsick, L. Ferrucci, R. Glynn, L. Berkman, D. Blazer, P. Scherr y R. Wallace, «A short physical performance battery assessing lower extremity function: association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission,» *Journal of Gerontology*, vol. 49, nº 2, pp. 85-94, 1994.
- [17] J. Guralnik, L. Ferrucci, E. Simonsick, S. M.E y ,. R. Wallace, «Lower-extremity function in persons over the age of 70 years as a predictor of subsequent disability,» *The New England Journal of medicine*, vol. 332, nº 9, pp. 556-61, 1995.
- [18] K. Ulrich y S. Eppinger, *Diseño y Desarrollo de productos*, Cuarta ed., México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2009.

Éster de aceite de palma (*Elaeis guineensis*) como aditivo deshidratante de crudos

Ester of palm oil (*Elaeis guineensis*) as a dehydrating additive for crude oils

Rubén Darío Vega-Mejía¹, José Gregorio Jiménez-Marcano²

Fecha de recepción: 2 de febrero de 2021
Fecha de aprobación: 28 de junio de 2021

Vega-Mejía, R.D; Jiménez-Marcano, J.G. Éster de aceite de palma (*elaeis guineensis*) como aditivo deshidratante de crudos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 139-151.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5598>



- 1 Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. Venezuela.
Correo electrónico: rvegas@udo.edu.ve
 <https://orcid.org/0000-0002-6331-3851>
- 2 Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. Venezuela.
Correo electrónico: jgjm1894@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-1001-9285>

Palabras clave

Aditivo deshidratante; éster; espectroscopias; prueba de la botella; transesterificación; emulsión.

Resumen

Un aditivo deshidratante actúa rompiendo la emulsión del agua contenida en el crudo, haciendo que las gotas se junten, aumenten su tamaño y por gravedad caigan, ocurriendo así la separación. Los ésteres han sido propuestos para tal fin, por lo que el presente trabajo evaluó el uso de éster de aceite de palma (*Elaeis guineensis*) como posible deshidratante de crudos. La investigación inició con la obtención de un biodiesel el cual seguidamente fue glucosidado para producir el éster, a ambos se les conocieron sus composiciones mediante la aplicación de una espectroscopia de infrarrojo (IR), demostrando solo diferencias entre ambos en el lapso de 3100 y 3700 cm^{-1} debido a la glucosa. Se caracterizó una muestra de crudo, resultando ser de tipo mediano de acuerdo a lo establecido por el *American Petroleum Institute* (API), además presentó un porcentaje (%) de agua y sedimentos de dos. Posteriormente, se formuló el producto deshidratante al adicionarle al éster glucosidado Xileno (90% Xileno-10% del éster). Se prepararon tres concentraciones (100, 200 y 300 ppm) y se procedió a realizar la prueba de la botella, obteniéndose resultados satisfactorios debido a que el aditivo logró romper la emulsión e hizo coalescer toda el agua contenida en el crudo a la menor concentración (100 ppm) en un tiempo de 60 min. Al aplicar una prueba no paramétrica de Fredman ($\alpha=0,05$) se demostró que no existen diferencias estadísticas significativas entre el deshidratante propuesto y uno comercial. Se concluyó que el producto es eficiente para el uso requerido.

Keywords

Dehydrating additive; ester; spectroscopy; bottle test; transesterification; emulsion.

Abstract

A dehydrating additive acts by breaking the emulsion of the water contained in the crude oil, causing the drops to come together, increase in size and fall by gravity, thus separating. Esters have been proposed for this purpose, so the present work evaluated the use of palm oil ester (*Elaeis guineensis*) as a possible crude dehydrator. The research began with the obtaining of a biodiesel which was then glycosidated to produce the ester, both their compositions were known through the application of infrared spectroscopy (IR), showing only differences between the two in the period of 3100 and 3700 cm^{-1} due to glucose. A crude oil sample was characterized, turning out to be of a medium type according to the provisions of the American Petroleum Institute (API), it also presented a percentage (%) of water and sediments of two. Subsequently, the dehydrating product was formulated by adding Xylene to the glucosidated ester (90% Xylene-10% of the ester). Three concentrations were prepared (100, 200 and 300 ppm) and the bottle test was carried out, obtaining satisfactory results because the additive managed to break the emulsion and coalesced all the water contained in the crude to the lowest concentration (100 ppm) in a time of 60 min. By applying a non-parametric Fredman test ($\alpha= 0.05$) it was shown that there are no statistically significant differences between the proposed dehydrating agent and a commercial one. It was concluded that the product is efficient for the use that was required.

Introducción

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la industria petrolera en la actualidad es la presencia de grandes cantidades de agua contenida dentro de las corrientes de crudo [1]. Inicialmente, el crudo producido en muchos de los yacimientos petrolíferos no contenían agua, o contenían muy poca. Pero, con el tiempo el agua se ha hecho presente en los depósitos de petróleo o se ha inyectado en forma de vapor para estimular la producción de crudo. El agua y el crudo se mezclan mientras se levanta o se produce a través del pozo y al pasar a través de válvulas y bombas para formar en la mayoría de los casos dispersiones relativamente estables de las gotas de agua en el petróleo (w/o), que se denominan generalmente como emulsiones en el campo petrolero [2]. No obstante, la recuperación (es decir, el desplazamiento) del petróleo atrapado en los yacimientos se ha vuelto cada vez más frecuente e importante a medida que los activos envejecieron y los productores quieren recuperar sus reservas restantes, que en la mayoría de los casos superan con creces lo que han producido hasta la fecha (es decir, durante la vida actual del campo) [3].

Alrededor del 80 % de los crudos explotados existen en estado emulsionado en todo el mundo [4]. Las compañías petroleras producen un promedio de tres barriles de agua por cada barril de petróleo que extraen de los yacimientos. Por lo que se puede decir que el agua se encuentra presente en todos los campos petroleros y es el fluido más abundante en ellos [5]. Actualmente, la cantidad de agua remanente emulsionada varía ampliamente desde 1 a 60 % en volumen. En los crudos medianos y livianos (>20 °API) las emulsiones contienen típicamente de 5 a 20 % volumen de agua, mientras que en los crudos pesados y extrapesados (<20 °API) tienen a menudo de 10 a 35 % de agua [6].

Como consecuencia, a nivel mundial se gastan más de 40 mil millones de dólares por año para hacer frente a los problemas del agua indeseada. En muchos casos, las tecnologías innovadoras para el control del agua pueden significar una reducción de los costos y un aumento en la producción de hidrocarburos [5]. Debido a la presencia de agua en los pozos de petróleo de resinas y asfaltenos presentes en el petróleo, los cuales desempeñan el papel de emulsionantes naturales, conducen a la formación de emulsiones [7]. Esta emulsión le proporciona al petróleo crudo un volumen adicional al transporte así como propiedades corrosivas, el cual se ve reflejado en la reducción de la vida útil de los equipos de proceso [8]. Las principales emulsiones que se forman en el petróleo son el tipo: aceite en agua (O/W), agua en aceite (W/O) o múltiple [9].

Una emulsión se comporta generalmente como un sistema termodinámicamente inestable [10], por lo que la estabilidad de las emulsiones tiene un intervalo de pocos minutos a años y varían dependiendo de las características del crudo y del agua [4]. Como la calidad del crudo se ve afectada por la presencia de agua, esta debe eliminarse para que cumpla con los requerimientos de la industria por debajo del 1 %, en un proceso que se denomina deshidratación o desestabilización, el cual consiste en forzar la coalescencia de las gotas de agua y producir así su separación [11].

La deshidratación es la rotura de una emulsión de petróleo crudo en fases de aceite y agua. Desde un punto de vista del proceso, el productor de petróleo está interesado en dos aspectos de la deshidratación; la tasa o velocidad a la que esta separación se lleva a cabo y la cantidad de agua que queda en el aceite crudo después de la separación [2]. La deshidratación del petróleo, como proceso, puede realizarse de disímiles maneras: mecánico, químico, térmico y eléctrico; dependiendo del tipo de crudo y de la disponibilidad de los recursos. El tratamiento mecánico se caracteriza por utilizar equipos de separación dinámica que permiten la dispersión de las fases de la emulsión y aceleran el proceso de separación gravitacional [12], [13].

La deshidratación o desestabilización química es el método más ampliamente aplicado de tratamiento de emulsiones agua en aceite (w/o) e implica el uso de aditivos químicos para acelerar el proceso de rotura de la emulsión [14]. La deshidratación química es un proceso en el cual la velocidad de adelgazamiento de la película es mejorada y la estabilidad de la película es reducida por un químico desestabilizante [15]. La sustancia que desestabiliza la emulsión es un compuesto que puede adsorberse en la interfase del agua - petróleo y cambiar sus propiedades con el fin de que las gotas de agua puedan agregarse y coalescer [16]. La ventaja de este método radica en que la separación de la emulsión puede realizarse en el pozo o en las instalaciones de superficie.

Actualmente, se han utilizado deshidratantes de origen ecológico para tratar estas emulsiones y por consiguiente reducir su impacto ambiental [17]. Esto debido a que las medidas ambientales y de seguridad son cada vez más estrictas para los productos químicos de los campos petrolíferos, por lo que existe un impulso significativo para desarrollar formulaciones más ecológicas (o “verdes”) que sean tan eficientes o más en comparación con los sistemas comerciales existentes [18]. En tal sentido, la presente investigación pretendió desarrollar un aditivo deshidratante para crudos a partir de éster de aceite de palma (*Elaeis guineensis*).

Metodología

Obtención y caracterización del deshidratante

Inicialmente, a partir del aceite crudo de palma se obtuvo un biodiesel, para el cual se aplicó un procedimiento de transesterificación [19], pero bajo un proceso mixto de metanólisis ácida y metanólisis básica. Las fases aplicadas se muestran seguidamente (figura 1).



Figura 1. Proceso de transesterificación aplicado al aceite crudo de palma.

Posteriormente, al biodiesel obtenido se le determinaron las propiedades físicas: índice de acidez [20], viscosidad cinemática [21], densidad por el método del picnómetro [22]. Tomando en cuenta, estas propiedades se comparó el biodiésel obtenido a partir del aceite crudo de palma con los rangos establecidos para biodiesel [23].

El biodiesel formulado fue sometido a un proceso de glucosidación [24], para así obtener el deshidratante, el proceso consistió básicamente en hacer reaccionar glucosa con el biodiesel durante un período de 17 horas, para posteriormente calentarlo en un microondas y finalmente filtrarlo. Por último, tanto el biodiesel como el deshidratante fueron sometidos a un estudio de Espectroscopia de Infrarrojo (IR) de Transformada de Fourier, utilizando un equipo Perkin Elmer FTIR 1600 que permitió conocer sus composiciones.

Caracterización de la muestra de crudo

La caracterización del crudo se realizó mediante la determinación de las propiedades: gravedad API, por el método del hidrómetro a partir de la norma ASTM D287 [25], densidad, por el método del picnómetro a través de la norma ASTM D 891 [22], viscosidad por medio del equipo Brookfield, empleando la norma ASTM D2196-10 [21], determinación del contenido de agua y sedimentos, usando la norma ASTM D4007 [26] y asfaltenos y resinas aplicando la norma ASTM D2007 [27].

Eficiencia del deshidratante

Para conocer la eficiencia del deshidratante desarrollado se aplicó la prueba de la botella [28], la cual consistió en añadir 100 mL de la emulsión en las botellas graduadas y estas a su vez fueron dosificadas con el deshidratante de aceite de palma (DP) (10%DP+90% xileno) en proporciones de 100, 200 y 300 ppm. El volumen de agua coalescida fue monitoreado durante períodos de tiempo establecidos (5, 10 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120 min). La prueba se elaboró bajo las mismas condiciones con un desemulsificante comercial (DC) (10%DC+90% xileno). Para comparar la eficiencia del desemulsificante DP con el comercial DC, se aplicó un estudio estadístico de varianza no paramétrica de Friedman con un nivel de significancia $\alpha=5\%$. Todas las prueba se repitieron tres veces y en el estudio se empleó el software estadístico InfoStat®.

Resultados

El aceite crudo de palma posee un alto contenido de ácidos grasos libres los cuales pueden ser solubles o no en agua, afectando el uso para el cual es requerido. El aceite presentó un color naranja (figura 2) con tonos ligeramente rojizos debido a su alto contenido de carotenos, principalmente betacaroteno (provitamina A), alfa-caroteno y licopeno; además contiene una relación balanceada entre ácidos grasos saturados y mono-insaturados por lo que su apariencia es semisólida a temperatura ambiente [29].



Figura 2. Aceite crudo de palma.

Posterior al proceso de transesterificación, el biodiesel formulado presentó un color naranja-rojizo traslucido (figura 3), siendo un indicativo de la purificación lograda [30]. Este aspecto traslucido parecido a un aceite diesel denota que el proceso se realizó de manera correcta y no ocurrió una oxidación, comúnmente presentada en los biodiésel debido a la presencia de carotenoides en él.



Figura 3. Biodiesel de aceite de palma.

Las propiedades estudiadas del biodiesel (cuadro 1) mostraron respecto a la densidad un valor de 0,89 g/mL, el cual se encuentra dentro del rango de la norma aplicada para verificar la calidad del biodiesel obtenido (0,86-0,9 g/mL). El valor de densidad es mayor a 0,873 g/mL [19] y menor a 0,9031 g/mL [31], valores reportados para otros biodiesel de palma aceitera, por lo que el proceso realizado se considera aceptable. La densidad de los biodiesel depende del grado de insaturación y de la longitud de las cadenas hidrocarbonadas de los esteres alquilos que lo conforman: a mayor cantidad de dobles enlaces y cadenas más cortas, mayor densidad.

Con respecto a la viscosidad cinemática el valor medido (4,85 cSt) se encuentra dentro de la norma de referencia (<5 cSt), difiriendo positivamente con el valor de 5,4 cSt de Bejumea, Agudelo y Cano [19]. Esto, es otro indicativo de la buena realización del proceso de transesterificación, debido a que mejoró la propiedad de fluidez eliminando la glicerina que es altamente viscosa. Las razones en variación de la viscosidad cinemática se debió a: disminución del contenido residual de glicerina, disminución del perfil de ácidos grasos y de la presencia de gomas o de jabones.

Finalmente, en cuanto a el índice de acidez el biodiesel presentó un valor de 0,37 mg NaOH/g, menor al valor normado (0,5 máx) e igualmente difiere de los valores de 0,15 mgKOH/g de investigaciones previas [31]. Un aumento de la acidez (por encima de 0,5) produce que se formen emulsiones y jabones debido a un favorecimiento de la reacción de saponificación durante el proceso. El valor de acidez del biodiesel se incrementa a medida que se aumenta la cantidad de peróxidos porque los enlaces ésteres del biodiesel se oxidan y forman peróxidos, que a su vez generan reacciones más complejas que involucran aldehídos los cuales se vuelven a oxidar en ácidos orgánicos [32]. Con ello se afecta la calidad del biodiesel debido a que conlleva a afectar la estabilidad oxidativa, el cual por ser de origen vegetal y de naturaleza lípida sufre degradaciones al igual que un aceite o grasa, por lo que se auto oxida, modificando su desempeño.

Cuadro 1. Propiedades del biodiesel obtenido

Propiedad	Valor obtenido	Valor normado
Color	Naranja rojizo traslúcido	
Densidad (g/mL)	0,89	0,86-0,9 g/mL
Viscosidad dinámica (cP)	4,32	Reportar
Viscosidad cinemática (15°C) (cSt)	4,85	<5
Índice de acidez (mg NaOH/g)	0,37	0,5 máx

Con respecto a las Espectroscopias (IR) para el biodiesel y el biodiesel glugosidado (figura 3), en ambos espectros se observa que entre 1000 y 1300 cm^{-1} existe una zona de huella dactilar de enlaces carbono-oxígeno (C-O). Asimismo, señales moderadas propias de la flexión de enlaces tipo alcano CH_3 y CH_2 respectivamente (alargamiento C-O) entre 1378 y 1460 cm^{-1} , las cuales confirman la presencia de cadenas alifáticas esperadas debidos a los triglicéridos de ácidos grasos. La falta de una banda ancha entre 2400-3500 cm^{-1} indicó la ausencia de señales de estiramiento de enlaces oxígeno-hidrógeno correspondiente a ácidos carboxílicos, lo que sugiere que la muestra presenta una baja acidez tal como se demostró al valorar la propiedad.

En 1743 cm^{-1} se detalla un pico característico de los grupos carbonilos o alargamiento carbonílico de tipo éster (C=O) que concuerda con la presencia de triglicéridos. Entre 2923 cm^{-1} - 2853 cm^{-1} existe la presencia de señales características de estiramiento de enlaces carbono-hidrógeno (C-H) alifáticos asimétrico y simétrico respectivamente. Se observa, en 3010 cm^{-1} un pico indicativo de un alargamiento oleofínico carbono-hidrogeno (C-H).

La diferencia del biodiesel de palma con el glucosidado estuvo en que en este último se pudo observar unos pequeños picos entre 3100 y 3700 cm^{-1} , los cuales son indicativos de presencia de pequeñas cantidades de glucosa, las mismas poseen cadenas (OH) que sirvieron de enlace con el agua (H_2O) para la rotura de la emulsión durante la evaluación como aditivo desemulsificante.

Zapata y Orozco [33] demostraron con mayor facilidad la adición de la molécula de D-glucosa al éster de etilo (biodiesel), debido a la presencia de la banda característica en 3662 cm^{-1} del enlace (O-H) presente en el mismo. A diferencia del biodiesel glucosidado que se utilizó en la presente investigación, en el cual no se evidenció gran cantidad de glucosa, es decir no se logró obtener una molécula anfifílica completa, ello debido a que quedó glucosa sin reaccionar, la cual fue filtrada, lo que evidenció que con el producto no se obtuvo el rendimiento esperado. Este resultado quizás sea consecuencia del uso de una glucosa de mala calidad o una dosificación errónea de esta en el proceso de glucosidación.

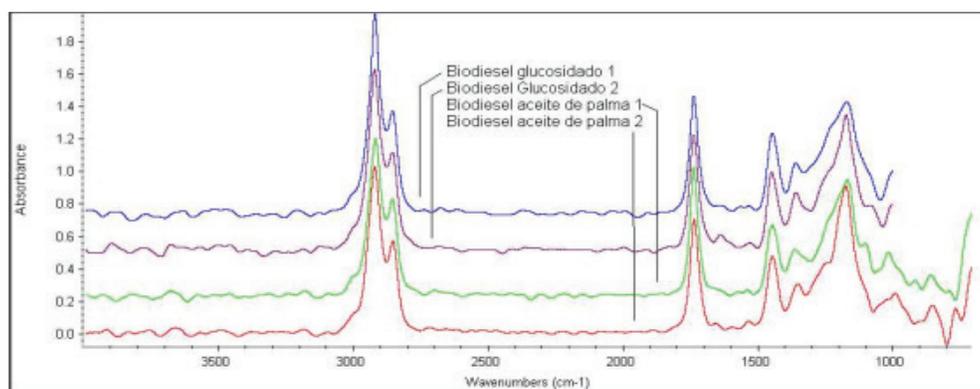


Figura 3. Espectros del biodiesel de palma y el biodiesel glucosidado.

El crudo utilizado durante la investigación provino del área petrolera de El Furrial del Distrito norte de PDVSA, el mismo poseía una gravedad API de 22,3°, por lo que de acuerdo al *American Petroleum Institute* (API) se encuentra dentro de la clasificación de crudos medianos 22° - 29,9°. Este tipo de crudo se caracteriza por su fácil transporte y extracción y es ideal para obtener combustible y materias primas para polímeros y parafinas.

Como se muestra en el cuadro 2, con respecto a la densidad se obtuvo un valor de 0,8934 g/mL, el mismo está dentro del rango de 0,92 – 0,87 g/mL característico de la propiedad para crudos medianos. El valor de la densidad es de gran importancia, porque indica que al momento de ocurrir la separación del agua contenida en el crudo, esta debe ubicarse en la parte inferior debido a que posee un valor mayor que la obtenida en el crudo.

El valor de la viscosidad dinámica fue de 124,47 cP, el efecto de la viscosidad sobre la emulsión radica en que una viscosidad alta disminuye el coeficiente de difusión y la frecuencia de colisión de las gotas, incrementándose la estabilidad de la emulsión [6].

El porcentaje de agua y sedimentos (% A y S) del crudo en estudio fue de 2%, esto representa el grado de impurezas presentes en el crudo y denota que está fuera de la especificación (>1 %) para su comercialización, este valor depende de donde se tomó la muestra, si directamente del pozo, del múltiple o de la propia línea de transporte.

Respecto al valor de asfaltenos y resinas obtenidos estos fueron de 5,38 % y 29,4% respectivamente. La fuerza de la película que envuelve las gotas de agua se forma por la adsorción de asfaltenos y resinas los cuales dan estabilidad a la emulsión.

Los valores de las propiedades descritas coinciden o se asemejan a los reflejados para dos muestras de crudo del área de El Furrial por Bello, Manzano y Marín [34]. Los autores evidenciaron para las muestras viscosidades API de 22,7° y 21,8°, densidad de 0,91 g/mL, viscosidad dinámica de 107,83 cP y 148,2 cP, porcentaje de agua y sedimento de 1,5% y 1,6%, asfaltenos de de 5,2% y 5,65%.

Cuadro 2. Propiedades de la muestra de petróleo crudo.

Propiedad	Valor obtenido
°API	22,3
Densidad (g/mL)	0,8934
Viscosidad dinámica (cP)	124,47
Viscosidad cinemática (cSt)	137,06
Agua y Sedimentos (%)	2
Asfaltenos (%)	5,38
Resinas (%)	29,4

Cuadro 3. Separación del agua a través del tiempo medida en mL.

Tiempo (min)	Comercial Diluido			Propuesto Diluido		
	100ppm	200ppm	300ppm	100ppm	200ppm	300ppm
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0,05	0	0	0
20	0,05	0,05	0,10	0,10	0,25	0
30	0,1	0,15	0,15	0,25	0,55	0,05
40	0,8	0,15	0,20	0,5	0,75	0,05
50	1,33	0,25	0,35	0,7	1,1	0,1
60	2	0,30	0,60	2	1,6	0,1
90	2	0,30	0,60	2	1,6	0,1

Para la realización de la prueba de la botella, se aplicó el desemulsificante en cada probeta según la dosis estipulada (cuadro 3). Se observa que la máxima separación se llevó a cabo a los 60 min, a partir de ese tiempo no hubo cambio. Este comportamiento es opuesto al mostrado por Sulaiman y Abdulsalam [35] con un agente deshidratante a base de aceite de *Jatropha curcas* y un crudo de mediano (23,1 °API), los cuales lograron la separación de 2 mL entre los 240 y 300 min en función de la concentración aplicada.

Técnicamente, para establecer cual agente deshidratante es más efectivo se parte del criterio que será aquel que permita coalescer la mayor cantidad de agua en el menor tiempo posible. Así, para la concentración de 100 ppm de aditivo DC y DP (figura 4), se detalla que ambos aditivos lograron extraer el 100% del agua (2 mL) en 60 min. No obstante, el comportamiento gráfico de ambos difiere, se observa que la desestabilización para DP fue lenta entre los 5 y 50 min donde solo logró extraer el 35 % de agua y a partir de este tiempo alcanzó el mayor porcentaje de extracción (65%). Mientras que el aditivo comercial alcanzó solo 5% hasta los 30 min y el 95% entre los 30 a los 60 min. El comportamiento con el aditivo a base de aceite de *Jatropha curcas* [35] tuvo un comportamiento nulo (cero de extracción de agua) a los 60 min.

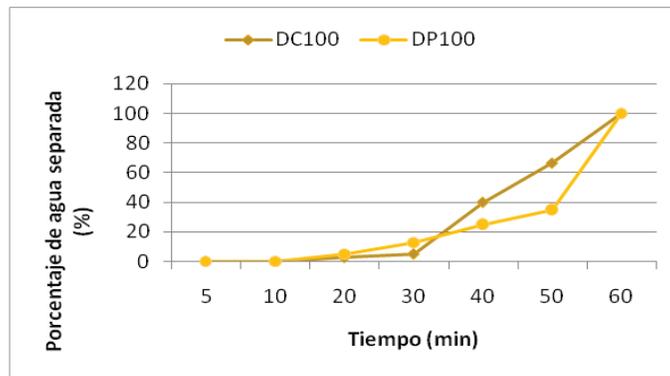


Figura 4. Comportamiento de los desmulsificante de palma (DP) y comercial (DC) a 100 ppm.

Luego se procedió a dosificar las probetas con 200 ppm, arrojando una separación de 15% con DC a los 60 min, el mismo presentó un comportamiento gráfico casi horizontal, mientras que el aditivo DP extrajo el 80% de agua, presentando un comportamiento lineal creciente entre los 20 y 60 min (figura 6). El aditivo a base de aceite de *Jatropha curcas* [35] para la concentración presentada comenzó a desestabilizar la emulsión a partir de los 240 min y alcanzó extraer 2 mL a los 300 min.

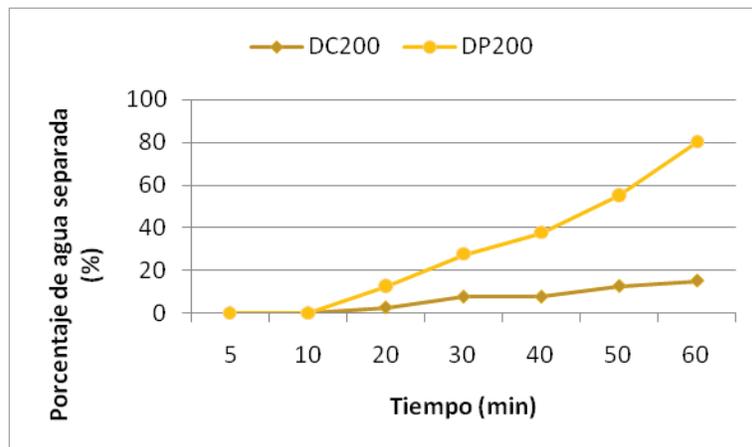


Figura 5. Comportamiento de los desmulsificante de palma (DP) y comercial (DC) a 200 ppm.

Por último se procedió a agregar una dosis de 300 ppm, dando como resultado una separación máxima para DC y DP de 30% y 5% respectivamente (figura 6). Se observa un comportamiento cercano al eje horizontal del aditivo DP con inicio de extracción de agua a partir de los 30 min, mientras que DC comienza a extraer agua a los 10 min hasta alcanzar el máximo señalado a los 60 minutos. Al igual que las otras dos concentraciones el aditivo de a base de aceite de *Jatropha curcas* [35] para 300 ppm comenzó la separación a partir de los 240 min hasta los 480 min.

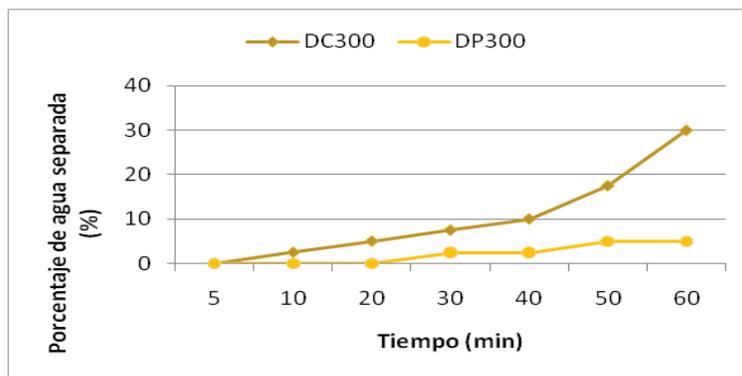


Figura 6. Comportamiento de los desmulsificantes de palma (DP) y comercial (DC) a 300 ppm.

De acuerdo a los resultados obtenidos se evidenció que el aditivo de palma (DP) tuvo mejor desempeño con la menor dosis de 100 ppm, donde se extrajo el 100% del agua emulsionada con el crudo y al aumentar la dosis a 200 ppm se disminuyó a un 80% (figura 7), mientras que para la mayor dosis de 300 ppm solo se alcanzó obtener un 15% de agua. Este comportamiento difiere del aditivo con *Jatropha curcas* [35], el cual la máxima separación la logra con 300 ppm (100%) mientras que al disminuir la dosis el porcentaje se redujo a 80% y 70% para 200 ppm y 100 ppm respectivamente. Aspecto que demuestra la mejor eficiencia del aditivo de palma.



Figura 7. Separación de agua con el producto propuesto con dosis de 100 ppm (a) y 200 ppm (b).

El análisis estadístico reflejó diferencias estadísticas significativas ($p\text{-valor} = 0,0009 < 0,05$). En la figura 8 se observa que los aditivos DP100, DP200 y DC100 no demuestran diferencias estadísticas significativas entre ellos (letras iguales, C) reflejando el mejor comportamiento. Asimismo, estos difieren con respecto a los demás DC300 (B), DC200 (B, A) y DP300 (A) los cuales no alcanzaron un desenvolvimiento satisfactorio, porque no lograron separar una cantidad de agua representativa en comparación con los tres anteriores. Esta conducta pudo ser motivada a una posible sobredosis en el sistema, actuando éste de manera inapropiada, produciendo una emulsión más fuerte y complicada de romper.

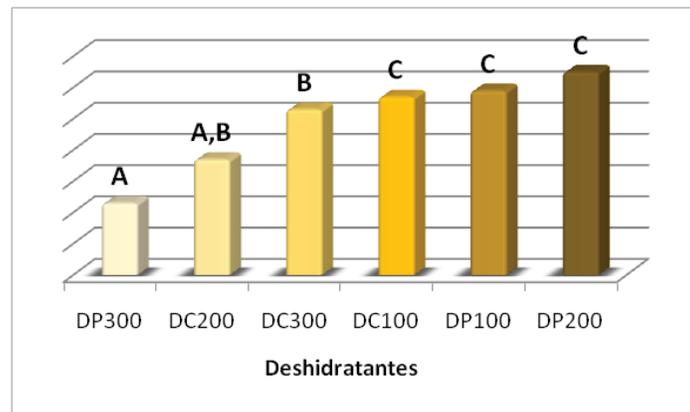


Figura 8. Varianza no paramétrica de Friedman para los deshidratantes de palma (DP) y comercial (DC) a las concentraciones de 100 ppm, 200 ppm y 300 ppm.

Estadísticamente no hubo diferencias en aplicar una dosis de 100 ppm o 200 ppm del aditivo de palma. Igualmente el estudio mostró un comportamiento disímil del aditivo de palma respecto al aditivo de *Jatropha curcas* [35] a pesar de que ambos provienen de aceites naturales, la diferencia se debió a los distintos procesos aplicados para obtener el aditivo.

Conclusiones y/o recomendaciones

El haber aplicado metanólisis ácida y básica en el proceso para la obtención del biodiesel permitió obtener un producto de calidad que satisfizo los criterios evaluados en la norma empleada, por lo que su aplicación es recomendable para obtener biodiesel de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) con buenas propiedades.

Si bien no se logró un proceso de glucocidación completo, este fue eficiente para el uso que fue requerido, es decir, para que extrajera el agua contenida en el crudo mediano. Sin embargo, sería importante repetir el estudio modificando la cantidad de glucosa o estudiando la calidad de la glucosa que permita una mejor reacción y se pueda probar con crudos de menor grado API (pesados y extra-pesados) y mayor contenido de agua como los de la Faja Petrolífera de Orinoco en Venezuela.

El aditivo propuesto (DP) deshidrató el crudo en estudio adecuadamente, pero es dependiente de la concentración a la cual dosifica, porque se observa el cambio del comportamiento de él con respecto a la dosificación. Al disminuir la dosis se mejora el proceso de deshidratación y el problema se centra en la velocidad a la que se realiza la deshidratación. No obstante, el tiempo obtenido es satisfactorio además de lograr una separación estable.

Referencias

- [1] Y. Mingxu, J. Huang, and J. Wang, "Research on Crude Oil Demulsification Using the Combined Method of Ultrasound and Chemical Demulsifier," *Journal of Chemistry*, pp. 1-7, 2017.
- [2] M. Chuiza, "Estudio comparativo de la deshidratación de emulsiones agua en aceite (w/o) en crudos medianos y pesados usando extractos de hojas de mora y corteza de pino," *Revista Ciencia e Ingeniería*, vol. 40, no. 2, pp. 149-156, 2019.
- [3] D. Nguyen and N. Sadeghi, "Selection of the Right Demulsifier for Chemical Enhanced Oil Recovery," in *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, The Woodlands, Texas, 2011.
- [4] I. Velasquez and J. Pereira, "Emulsiones de agua en crudo. Aspectos Generales," *Revista Ingeniería UC*, vol. 21, no. 3, pp. 45 - 54, 2014.
- [5] C. Romano, "Control del agua," *Oilfield Review*.



- [6] S. Marfisi and J. Salager, *Deshidratación de crudo. Principio y tecnología*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, 2004.
- [7] P. Kilpatrick, "Water-in-crude oil emulsion stabilization: Review and unanswered questions.," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 7, pp. 4017–4026, 2012.
- [8] B. Pérez and F. Garfias, "Deshidratación del crudo Maya mediante un campo eléctrico de corriente continua ," *Revista de la Sociedad Química de México*, vol. 46, no. 3, pp. 227-234, 2002.
- [9] S. Melek, J. Hernández, A. Moro, and Y. Silveira, "Comportamiento reológico de emulsiones de agua en petróleo (w/o) tratadas magnéticamente ," *Revista Tecnología Química*, vol. 38, no. 1, pp. 58-69, 2018.
- [10] E. Martínez, L. Acosta, and F. Ramírez, "Emulsificación de petróleo crudo para su transporte por oleoductos," *Ing. Investig. y Tecnol*, vol. 17, pp. 395–403, 2016.
- [11] M. Nurainia, H. Abdurahmanab, and A. Kholijaha, "Effect of chemical breaking agents on water-in-crude oil emulsion system," *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 250–254, 2011.
- [12] R. Kumar, "Studies on the Effect of Surfactants on Rheology of Synthetic Crude," *Journal of Petroleum Science Research*, vol. 3, no. 2, pp. 90-99, 2014.
- [13] RM Palou, "Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 274-282, 2011.
- [14] A. Abdel, R. Abdel, and R. Abdul, "Sugar-based ethoxylated amine surfactants as demulsifiers for crude oil emulsions: 2-demulsification of different types of crudes," *Brazilian journal of Petroleum and Gas*, vol. 4, no. 4, pp. 155-165 , 2010.
- [15] M. Chuiza, Y. Rivera, J. Ramírez, and H. Garmendia, "Estudio experimental de la deshidratación de un crudo mediano usando extractos de hojas de mora y corteza de pino ," *Revista Ciencia e Ingeniería*, vol. 39, no. 3, pp. 279-286, 2018.
- [16] J. Wu, Y. Xu, T. Dabros, and H. Hamza, "Effect of Demulsifier Properties on Destabilization of Water-in-Oil Emulsion," *Energy & Fuels*, vol. 17, pp. 1554-1559, 2003.
- [17] B. Aliyu, A. Abu, "Assessment of Plant Extracts as Green Demulsifiers," *Journal of the Japan Petroleum Institute*, vol. 60, no. 4, pp. 186-193, 2017.
- [18] H. Zhou, K. Dismuke, N. Lett, and Penny. G., "Development of More Environmentally Friendly Demulsifiers," in *International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control* , Louisiana, 2012.
- [19] P. Benjumea, P. Agudelo, and G. Cano, "Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel," *Scientia Et Technica*, vol. X, no. 24, pp. 169-174, 2004.
- [20] Internacional Organization for Standardization [ISO], "Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de acidez y de la acidez ," Ginebra, Norma ISO 660 2009.
- [21] American Society for Testing and Materials [ASTM], "Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer," West Conshohocken PA, Norma ASTM D2196 - 20 2015.
- [22] American Society for Testing and Materials [ASTM], "Standard Test Methods for Specific Gravity, Apparent, of Liquid Industrial Chemicals," West Conshohocken, Norma ASTM D891 2009.
- [23] European Committee for Standardization [CEN], "Liquid petroleum products. Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications. Requirements and test methods," Bruselas, Norma BS EN 14214 2012.
- [24] V. Melo and O. Cuamatzi, *Bioquímica de los procesos metabólicos*, 3rd ed. Ciudad de México, México: Editorial Reverté, 2006.
- [25] American Society for Testing and Materials [ASTM], "Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method)," West Conshohocken, PA, Norma ASTM D287 2012.
- [26] American Society for Testing and Materials [ASTM], "Standard Test Method for Water and Sediment in Crude Oil by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure)," West Conshohocken PA, Norma ASTM D4007 2016.
- [27] American Society for Testing and Materials [ASTM], "Standard Test Method for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils and Other Petroleum-Derived Oils by the Clay-Gel Absorption Chromatographic Method," West Conshohocken, PA, Norma ASTM D2007 2011.
- [28] Ecopetrol, "Pruebas de botella para selección de especies químicas deshidratantes en crudos," Huíla, Metodología ante fallas técnicas para el contrato 5210390 2011.

- [29] S. Rincón and D. Martínez, "Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria," Medellín, Investigación Cenipalma 2009.
- [30] J. Gandón, Y. Torres, and M. García, "Caracterización de un biocombustible obtenido a partir de aceite vegetal de desecho," *Tecnología Química*, vol. XXXVII, no. 2, pp. 278-292, 2017.
- [31] A. Alonso et al., "Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite crudo de la palma africana *Elaeis guineensis*," *Ingeniería*, vol. 17, no. 2, pp. 103-109, 2013.
- [32] A. Bouaid, M. Martínez, and A. Aracil, "Production of biodiesel from bioethanol and Brassica carinata oil: Oxidation stability study," *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 2234-2239, 2009.
- [33] J. Zapata and E. Orozco, "Evaluación de la síntesis de surfactantes a partir de," Universidad de Carabobo, Valencia- Venezuela, Trabajo de grado 2018.
- [34] Y. Bello, J. Manzano, and T. Marín, "Análisis comparativo de la eficiencia dispersora de asfaltenos de productos a base de aceite de coco (*Cocos nucifera*) como componente activo y dispersantes comerciales aplicados a muestras de petróleo del Campo el Furrial, estado Monagas, Venezuela," *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, vol. 28, no. 2, pp. 51-61, 2015.
- [35] A. Sulaiman and S. Abdulsalam, "Formulation of Demulsifiers from Locally Sourced Raw Materials for Treatment of a Typical Nigerian Crude Oil Emulsion," in *The Nigeria Annual International Conference and Exhibition*, Lagos, Nigeria, 2016.
- [36] American Society for Testing and Materials [ASTM], "Standard Test Method for Flash Point by the Equilibrium Method With a Closed-Cup Apparatus," West Conshohocken PA, Norma ASTM D-92 2014.

Ensayos in vitro para cuantificar la actividad biológica de citocinas

In vitro assays to quantify the biological activity of cytokines

Ayerin Carrodegua-González¹, Andrés Zúñiga-Orozco²,
María Victoria Ortiz-Cruz³

Fecha de recepción: 3 de marzo de 2021
Fecha de aprobación: 6 de agosto de 2021

Carrodegua-González, A; Zúñiga-Orozco, A; Ortiz-Cruz, M.V. Ensayos in vitro para cuantificar la actividad biológica de citocinas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 152-166.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5638>

- 1 Investigadora independiente en Biología, Mayabeque, Cuba.
Correo electrónico: ayerim2009@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5890-4174>
- 2 Docente e Investigador. Carrera Ingeniería Agronómica. Universidad Estatal a Distancia (UNED). San José, Costa Rica.
Correo electrónico: azunigao@uned.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8214-4435>
- 3 Reserva de la Biosfera, Sierra del Rosario, ECOVIDA, CITMA, Artemisa, Cuba.
Correo electrónico: mvortiz2697@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-9140-0971>



Palabras clave

Ensayos biológicos; líneas celulares; contaminación; potencia biológica; fármacos, paralelismo.

Resumen

Las citocinas son moléculas de bajo peso molecular que son fundamentales en la respuesta inflamatoria e inmune y en numerosos procesos biológicos y celulares. Son el ingrediente activo de numerosos fármacos, producidos para tratar diferentes enfermedades; muchas de las cuales están relacionadas con el funcionamiento del sistema inmune. Estos medicamentos, antes de ser comercializados, deben cumplir con una serie de requisitos, entre los que se encuentra, la cuantificación de la actividad biológica. Este parámetro se mide a través de ensayos biológicos *in vivo* e *in vitro*, siendo estos últimos los más utilizados por su mayor rapidez y versatilidad. Los ensayos *in vitro* son realizados en locales con todo el equipamiento necesario y el personal con la suficiente experiencia para llevarlos a cabo. Existen muchos factores que pueden influir en la calidad de estos métodos analíticos, los cuales se deben mantener bajo un estricto control para la aprobación final del ensayo. Por tales razones, el objetivo de esta revisión es reunir las bases teóricas para la realización de ensayos *in vitro* para cuantificar la actividad biológica de citocinas, así como los factores que influyen en la calidad de estos.

Keywords

Bioassays; cell lines; contamination; biological potency; drugs; parallelism.

Abstract

Cytokines are low molecular weight molecules that play a fundamental role in the inflammatory and immune response and in numerous biological and cellular processes. They are the active ingredient in many drugs, produced to treat different diseases, many of these related to the immune system. These drugs, before being marketed, must meet a series of requirements, among which is the quantification of biological activity. The biological activity of cytokines is measured through *in vivo* and *in vitro* biological tests, the latter being the most widely used due to their greater speed and versatility. *In vitro* tests are carried out in places with all the necessary equipment and personnel with sufficient experience to carry them out. There are many factors that can influence the quality of these analytical methods, which must be kept under strict control for approval. For these reasons, the objective of this review is to gather the theoretical bases for conducting *in vitro* assays to quantify the biological activity of cytokines, as well as the factors that influence their quality.

Introducción

Las citoquinas o citocinas son moléculas de bajo peso molecular que poseen la capacidad de modular la función de células y tejidos. Principalmente son producidas por los leucocitos, aunque algunas de ellas son secretadas por otros tipos celulares. Las citoquinas, además de tener un papel fundamental en la respuesta inflamatoria e inmune, están implicadas en numerosos procesos biológicos como la hematopoyesis, embriogénesis y angiogénesis, así como en diferentes procesos celulares como mitosis, diferenciación, migración o incluso muerte celular. Las citocinas también, han sido utilizadas como ingrediente activo para la elaboración de diversos fármacos de gran importancia para el tratamiento de diferentes enfermedades [1, 2, 3].

Los productos biotecnológicos obtenidos utilizando citocinas como ingrediente activo, necesitan contar con una serie de requisitos para ser comercializados, los cuales se comprueban analizando los Ingredientes Farmacéuticos Activos (IFAs) y los Productos Terminados (PT) de dichos fármacos. La cuantificación de la actividad biológica es uno de los parámetros principales para comprobar la calidad de los productos con el fin de permitir su uso clínico y comercialización [4]. Para medir la actividad biológica, se utiliza un gran número de métodos basados en ensayos biológicos [5]. Un paso importante en la realización de estas técnicas consiste en evaluar cuál tipo de ensayo es el más adecuado [6]. Con este objetivo, los analistas deben basarse en consideraciones científicas, económicas, estadísticas y prácticas [4].

Generalmente, los métodos utilizados para el cálculo de la actividad biológica de un producto farmacéutico, son los ensayos *in vitro* basados en líneas celulares establecidas debido a que son más ventajosos y menos variables que los ensayos *in vivo* [7, 8, 9]. Los ensayos *in vitro* se cuantifican mediante diferentes métodos de revelado, de los cuales el más recomendable por su sencillez y bajo costo es el método colorimétrico [10]. Este se basa en añadir un colorante a las células y posteriormente medir la absorbancia mediante un lector espectrofotómetro [11]. Los ensayos biológicos se deben realizar en áreas asépticas que posean las condiciones adecuadas y el personal con la experiencia necesaria para llevar a cabo estas técnicas analíticas [4].

Existen muchos factores que pueden influir negativamente en los resultados de un ensayo *in vitro*, los cuales deben ser estrictamente controlados para obtener resultados verídicos. Entre esos factores se encuentran, las contaminaciones, el diseño de la placa de cultivo y el manejo de las células durante el ensayo. El conocimiento de estos factores y la base teórica sobre las cuales se realizan los ensayos de actividad biológica son recursos necesarios con los que debe contar todo el personal que se incorpora a los laboratorios de control de la calidad en los diferentes centros de producción de fármacos. Existe mucha información sobre estas técnicas analíticas, pero se encuentra muy poco sintetizada y fragmentada en múltiples fuentes bibliográficas [4, 6, 11]. Debido a las razones anteriores, el objetivo del presente estudio es reunir las bases teóricas para la realización de ensayos *in vitro* para cuantificar la actividad biológica de citocinas, así como los factores que influyen en la calidad de estos.

Citocinas como blancos de los ensayos de actividad biológica

Las citocinas son un grupo de proteínas de rápido crecimiento que controlan el mantenimiento y la actividad del sistema inmune [12]. Las cuales presentan un amplio rango de actividad biológica sobre un gran número de tipos de células, sobre las cuales pueden inducir proliferación, diferenciación y maduración (figura 1) [1, 2]. Estas moléculas pueden ser producidas principalmente por células dendríticas y fagocitos mononucleares [1] y actúan en vivo en un gran complejo de proteínas interactuantes para lograr el control del sistema inmune [13]. Diferentes células pueden secretar la misma citocina, y solo una de estas moléculas puede afectar severamente distintos tejidos; esta propiedad es llamada pleiotropía [14].

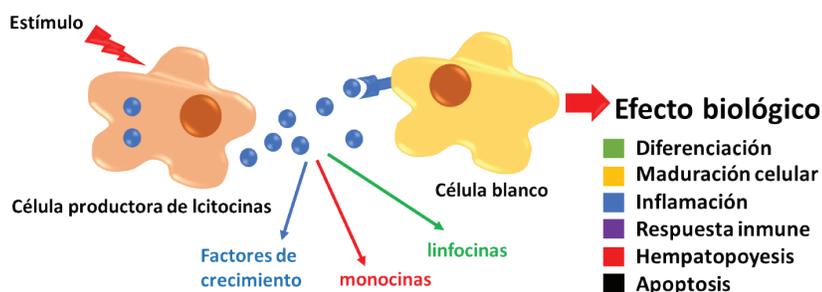


Figura 1. Principales efectos biológicos de las citocinas sobre las células blanco

Estas moléculas frecuentemente actúan en cascadas de señalización; es decir, una citocina estimula a la célula blanco a producir más citocinas, se unen a receptores específicos y activan mensajeros intracelulares que regulan la transcripción de genes [14]. Están involucradas en procesos inflamatorios, responsables de las infecciones [15, 16]. Además, se ha demostrado que son importantes en la patogénesis de muchos desórdenes clínicos y presentan un alto potencial para el tratamiento de un amplio rango de enfermedades [2, 11]. También, se ha demostrado su importancia en la respuesta inmune ante la infección por COVID-19 [17, 18, 19, 20].

Las citocinas pueden ser divididas en clases funcionales; por ejemplo, algunas citocinas son primariamente factores de crecimiento linfocíticos, otras funcionan como proinflamatorias o antiinflamatorias, y muchas otras se encargan de la respuesta inmune ante antígenos [21]. Uno de los grupos de citocinas más utilizados como ingrediente activo en la fabricación de fármacos, son los factores de crecimiento, los cuales son una familia de proteínas que actúan principalmente sobre tejidos no hematopoyéticos [22]. Como las hormonas clásicas, los factores de crecimiento son moléculas relativamente pequeñas, altamente solubles y de estructura compacta [23, 24].

Existen tres familias de factores de crecimiento bien caracterizadas, basadas en su estructura y actividad biológica. La primera familia está representada principalmente por el Factor de Crecimiento Derivado de Plaquetas y el Factor de Crecimiento Derivado de Fibroblastos. En la segunda familia se incluye el Factor de Crecimiento Epidérmico y el Factor de Crecimiento Transformante Beta. La última familia, la constituyen los factores de crecimiento tipo insulínicos [25].

¿Qué son los ensayos biológicos?

El desarrollo de materiales biológicos implica la valoración meticulosa de seguridad, eficacia y calidad. La calidad tiene que ser evaluada con el uso de una variedad de técnicas analíticas, inmunológicas y físico-químicas, mientras la seguridad y la eficacia son establecidas a través de estudios de toxicidad y pruebas clínicas [26].

Los ensayos biológicos (EB) son importantes como señalizadores de seguridad, ya que pueden medir la potencia y pueden ilustrar eficacia como una medida directa de actividad biológica [5]. Los EB son técnicas mediante las cuales se puede medir una propiedad de una sustancia por la respuesta que produce en un sistema biológico [8, 27]. Estos ensayos pueden ser de varios tipos: desde ensayos *in vivo* hasta ensayos *in vitro* que utilizan líneas celulares establecidas [11].

Los ensayos *in vivo* pueden proveer información invaluable acerca de la actividad biológica de citocinas, así como también una valoración útil de su potencia biológica [28, 29]. Sin embargo, tales pruebas pueden ser de muy alto costo, implican gran número de animales, y son a menudo imprecisas y trabajosas de realizar [27, 30, 31]. Por tanto, estos métodos han sido mayormente reemplazados por ensayos *in vitro* que requieren cultivos primarios de células o líneas celulares continuas [6, 32].

Ensayos biológicos *in vitro*

Para los ensayos *in vitro*, como consecuencia de su extenso uso, existe un amplio rango de soporte tecnológico disponible y comparados con los ensayos *in vivo*, presentan las siguientes ventajas [13, 31].

- Presentan menor cantidad de variables incontrolables.
- Son más económicos y controlables.
- Se produce menor variabilidad en la respuesta biológica.
- Evitan el uso de animales vivos.
- Presentan mayor capacidad de procesamiento.
- Son más adecuados para la automatización.
- Son más flexibles y rápidos.
- Presentan mayor rango de tecnologías disponibles.

En los ensayos basados en líneas celulares, el sujeto biológico estimulado por el fármaco a evaluar, es un cultivo de células provenientes de líneas celulares establecidas (comerciales) derivadas generalmente de la sangre, médula espinal o tejidos de organismos superiores (cuadro 1) [32].

Cuadro 1. Ejemplos de ensayos de actividad biológica de Citocinas y Factores de Crecimiento basados en el uso de líneas celulares [11].

Citocina	Línea celular	Origen	Tipo de ensayo	Curva dosis respuesta
IL-2	CTLL-2	Células T citotóxica murina	Proliferación celular	0,1 - 20 UI
IFN	Hep-2/ Virus mengo	Carcinoma laríngeo humano/Picornavirus murino	Antiviral	0.1 - 16 UI
IFN	Daudi	Células linfoblastoides humanas	Inhibición de la proliferación celular	1pg – 100 pg
G-CSP	GNFS-60	Leucemia mieloide murina	Proliferación celular	0.4 – 100 UI
TFN	L-929	Fibroblasto murino	Citotoxicidad	0.2 – 4 UI
FCE	3T3 A31	Fibroblasto murino	Proliferación celular	0.1 – 20 UI

La cuantificación de la actividad biológica de citocinas se puede realizar a través de varios tipos de ensayos *in vitro*:

Ensayos de proliferación y anti proliferación celular: son los bioensayos más versátiles basados en líneas de células para la mayoría de las citocinas [33, 34]. En estos métodos, los grados de citocinas son estimados debido a su habilidad para estimular o inhibir la proliferación de las células [6].

Ensayos Antivirales: se basan en un sistema célula-virus donde se evalúa un producto por su capacidad de proteger a las células ante los efectos citopatogénicos del virus empleado. La actividad antiviral potente de algunas citocinas constituye el principio básico de estos ensayos. Los procedimientos involucran la incubación de células susceptibles con citocinas antes la adición de un virus y estimar el incremento en la supervivencia de la célula debido a una reducción en el efecto del virus [35].

Ensayos Citotóxicos: se basan en el efecto citotóxico que posee un producto sobre las células de la línea empleada [36, 37].

Métodos de revelado

En los diferentes tipos de ensayos, es necesario cuantificar, la cantidad de células resultantes debido a la acción de la citocina que se evalúa. Para esto, se utilizan reveladores que pueden ser tinciones o sustancias que provocan reacciones químicas observables en la célula. Los diferentes métodos de revelado se exponen a continuación:

Colorimétrico: es uno de los métodos más utilizados por ser muy práctico y barato [10, 38]. Se emplean diferentes colorantes que se incorporan a las células vivas, las cuales posteriormente se leen en un lector fotométrico a una longitud de onda determinada que depende del colorante empleado [39]. Después de añadido el colorante, se puede apreciar en las placas de 96 pocillos a simple vista, un gradiente de intensidad de color proporcional a la concentración celular, en caso de que se trate de ensayos de factores de crecimiento en los cuales la proliferación celular aumenta por la adición de la citocina [40]. En este tipo de ensayo, la concentración celular que se observa depende de la dosis del fármaco aplicada. En los pocillos de la placa de cultivo, donde se añade una mayor concentración de citocinas, se observa que el color desarrollado es más intenso, en correspondencia con los pocillos donde la concentración es menor (figura 1).

Los reveladores de los ensayos colorimétricos pueden ser: Sal de Tetrazolium (MTT), Alamar Blue, Cristal violeta (CV), Negro amido y Rojo neutro [11].

Radioactivo: en estos ensayos se utiliza timidina tritiada, la cual se incorpora al ADN celular y es leída posteriormente en un contador de radioactividad [41].

Ensayos que utilizan MTT como revelador: uno de los reactivos que más se utilizan para evaluar proliferación celular, es la sal de tetrazolium (MTT). Este método fue desarrollado por Mosmann en 1983 [41] y modificado por Denizot y Lang en 1986 [42]. Durante esta técnica, el MTT es reducida por la enzima mitocondrial succinato-deshidrogenasa en un compuesto de color rojo (formazán) (figura 2B). Posteriormente, los cristales de formazán deben ser disueltos con el uso de un solvente [43]. Primeramente, se suponía que la reducción de la sal de tetrazolium solo se debía a los procesos mitocondriales durante la cadena respiratoria, pero actualmente se sabe que también están implicadas las fracciones citoplasmáticas y microsomales [44, 45].

Este método permite determinar la actividad mitocondrial de las células tratadas, de forma que la cantidad de células vivas es proporcional a la cantidad de formazán reducido. Es una prueba muy sensible y muestra linealidad en un amplio rango de concentraciones [41]. Este revelador implica menos afectaciones durante los ensayos, pues al consistir en una reacción química, no requiere que se deseche contenido de las placas ni que estas sean lavadas, lo cual disminuye la manipulación y la posible pérdida de las células.

Ensayos que utilizan como revelador Cristal Violeta: la técnica de Cristal Violeta se basa en la tinción de las células con una solución de este colorante (figura 2A). Esto nos permite cuantificar mediante un lector espectrofotométrico la densidad óptica (DO) de la placa [46]. Con este método, la manipulación de las células es muy estresante, pues para teñirlas, primeramente,

es necesario desechar el contenido de las placas con lo cual pueden sufrir daños. Después de teñir las placas es necesario el lavado de estas para eliminar los excesos de colorante, proceso que también provoca la pérdida de muchas células.

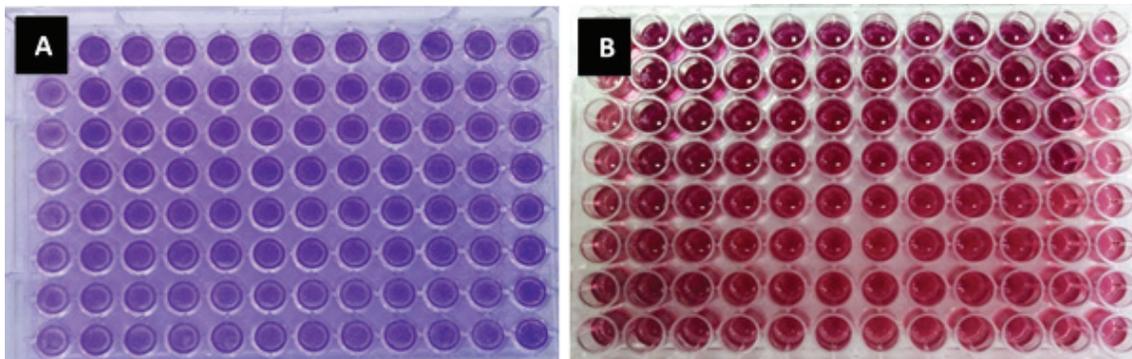


Figura 2. Placas de 96 pocillos reveladas con Cristal Violeta (A) y MTT (B). En este diseño, se colocó una mayor concentración de citocinas en los pocillos superiores, por lo cual se observa una disminución de la proliferación celular en los pocillos inferiores.

Factores que pueden influir en la calidad de los ensayos in vitro basados en líneas celulares

1. Contaminaciones por agentes microbianos

Los ensayos biológicos basados en líneas celulares pueden ser afectados principalmente por contaminación por agentes microbianos como producto de una mala manipulación, lo cual puede ser muy común [47, 48, 49]. Si durante un ensayo aparecen síntomas de contaminación, tanto en los frascos como en las placas de cultivo; es necesario recurrir a un nuevo cultivo celular. Las contaminaciones pueden provocar afectaciones graves en la respuesta de las células y por tanto se obtienen resultados muy variables [50].

2. Diseño de la placa de cultivo

Los ensayos biológicos deben contar con un diseño adecuado de las placas de cultivo porque durante la incubación pueden ocurrir afectaciones en el borde de la placa [47]. Durante su diseño es importante colocar las muestras aleatoriamente, sin utilizar los pocillos del borde. Las afectaciones que ocurren en el borde de la placa durante la incubación se deben al mayor intercambio que sufren estos pocillos con el ambiente de la incubadora y la posición que ocupe la placa dentro de esta [4].

3. Factores relacionados con el manejo de las células

Otros factores que pueden afectar los ensayos biológicos son: el tipo de célula que se utiliza (si son adherentes o no), la descongelación, densidad, confluencia, frasco utilizado en el cultivo, requerimiento de suero, condiciones de cultivo (temperatura, CO₂, humedad, tiempo), conteo de células, determinaciones de salud de la células y estabilidad de la línea celular. También se deben tener en cuenta, la calidad de la muestra a analizar, el diseño del ensayo, la documentación, el personal encargado, el equipamiento y las instalaciones [4].

Por otra parte, la descongelación de las células puede afectar los resultados de un ensayo de actividad biológica, pues constituye un proceso muy drástico [52], esto se debe a que inicialmente, se encuentran almacenadas a temperaturas de -196°C en nitrógeno líquido y

pasan directamente a un baño con 37°C y, por tanto, es inevitable que ocurra muerte celular [54]. En los EB las células deben ser mantenidas con una confluencia menor del 90%. A una confluencia mayor que este valor, muchas células se desprenden por el contacto con células vecinas [40].

En muchos ensayos biológicos para el control de citocinas, se utilizan células de anclaje (se adhieren a la superficie del frasco), por tanto, se necesita una enzima que pueda escindir las proteínas de unión para poder expandir y realizar el conteo. Para esto se utiliza la tripsina, una enzima que rompe enlaces peptídicos en las proteínas de adhesión [50]. Debido a esto, las células quedan en suspensión con una forma redondeada y con diferente morfología (figura 3). Es importante tener en cuenta que, la acción de la tripsina durante un tiempo prolongado de exposición provoca la muerte celular, lo cual crea la necesidad de una buena manipulación de los cultivos para que no ocurran daños morfológicos y detritos celulares [48].

En algunos ensayos de actividad biológica de citocinas, se frecuenta estresar las células antes de añadirle el fármaco para que su respuesta sea óptima. El estrés celular consiste en mantener las células durante 24 horas sin Suero Fetal Bovino (SFB). Durante este proceso, las células sufren porque no se les administra suero, lo cual provoca un cese de la proliferación debido a que este contiene factores de crecimiento necesarios para el crecimiento [50]. Para esto, primeramente, es necesario desechar el medio de mantenimiento de las células y poder administrarles medio sin suero. Durante este paso es necesario eliminar los residuos de SFB mediante lavados con Tampón Fosfato Salino (PBS) o de lo contrario, este puede interferir en la respuesta celular que debe resultar de la adición de los fármacos. Durante este paso, se pierden células que no se encuentran adecuadamente adheridas a la superficie de las placas. Este proceso afecta la concentración celular a la cual deben encontrarse las células en el momento de administrarles los fármacos, lo cual no implica afectaciones en la respuesta proliferativa de las células [11].

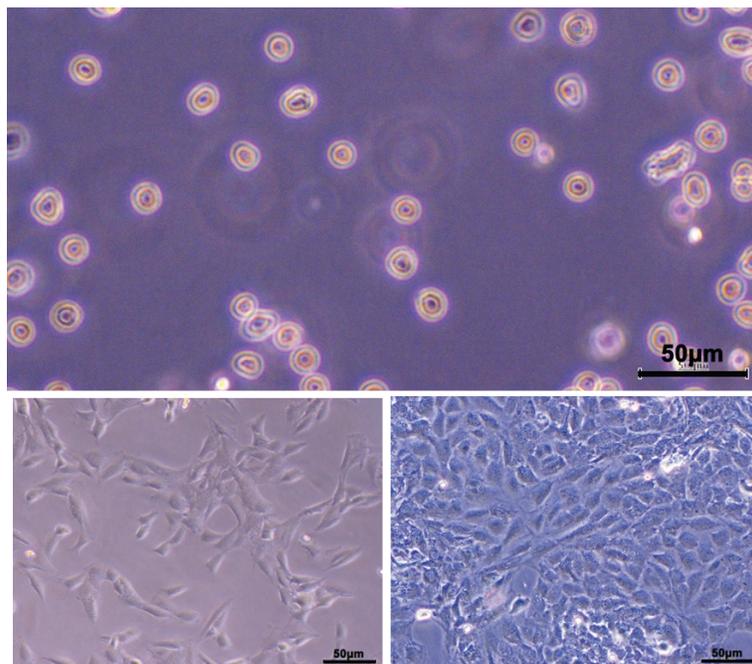


Figura 3. Fibroblastos durante un EB, cultivadas en medio DMEM con SFB al 10%. A: Células en suspensión acabadas de tripsinizar; se observa su forma redondeada. B: Células en cultivo durante 24h con una confluencia celular aproximada del 50%; se observa la forma alargada clásica de los fibroblastos. C: Células en cultivo durante 72h con una confluencia celular aproximada del 90%.

El factor más importante en cuanto a las células, que puede influir en los ensayos basados en líneas celulares es la generación que se utiliza, puesto que, el estado metabólico y la salud de las células tienen gran influencia en los resultados de los ensayos. Cuando se obtienen sucesivas generaciones que se compran de una línea comercial, su respuesta tiende a variar con el número de subcultivos que se realicen [6]. Por tanto, las células necesitan ser renovadas periódicamente por otras que provengan del primer grupo o la calidad del ensayo disminuye. Para asegurar alta calidad de los ensayos es necesario contar con bancos de células originalmente obtenidas, las cuales son congeladas para renovar los cultivos [51]. Cada descongelación no debe ser utilizada por más de tres meses [4].

Bancos de células

Se deben tener en cuenta varias consideraciones en el desarrollo de los bancos de células. El origen de la línea celular, ya sea obtenida del fabricante del producto, o adquirida por un colaborador, institución académica o una colección de cultivos debe tener documentación que detalle la historia de la línea celular, que justifique su aplicación para uso comercial. La propagación también debe ser documentada y descrita en detalle para permitir la recreación de una línea celular similar si fuera necesario. También debe ser documentada información acerca de la línea celular durante el desarrollo de los ensayos [52].

Es necesaria una extensiva caracterización para asegurar la calidad y longevidad del banco de células. Después de que la línea celular haya sido caracterizada, estará lista para crear los bancos y un sistema de bancos debe contener un Banco Primario y Bancos de Trabajo [53].

Banco de Células Primario (BCP): está formado por células bien caracterizadas que se obtienen a partir de la expansión controlada del vial de la casa comercial. Las células se conservan en nitrógeno líquido a -196°C . Estos bancos deben ser cuidadosamente preparados porque muchas células suelen ser sensibles a la criopreservación, descongelación y condiciones de cultivo. También deben ser sometidos a un extenso número de ensayos que permitan asegurar su identificación y caracterización antes de ser utilizados para la validación de estudios o para su uso regular en laboratorios [54].

Banco de Células de Trabajo (BCT): estos bancos se originan a partir de la expansión controlada del BCP. Se conservan igualmente en nitrógeno líquido a -196°C y se emplean en los ensayos biológicos *in vitro*. El tamaño de los bancos depende del crecimiento característico de las células, el número de células requerido para cada ensayo y de la frecuencia con que se realizarán los ensayos [50].

Estándar utilizado en los ensayos de actividad biológica

En los ensayos biológicos debe utilizarse una sustancia de referencia que debe ser un Ingrediente Farmacéutico Activo (IFA) o producto Terminado (PT) de calidad y pureza establecida, cuya potencia biológica ha sido medida en comparación con un estándar primario. A esta sustancia se le llama Material de Referencia (MR).

El MR es un agente crítico en los bioensayos porque de su calidad dependen los resultados de estas técnicas. Presenta propiedades suficientemente bien establecidas, por lo que puede ser utilizado como curva de referencia en la evaluación de un método de medición o para asignar valores a otros materiales [4].

El MR utilizado debe ser de la misma naturaleza de la citocina a ensayar, y necesita ser preparado de ser posible, por los mismos procesos del producto al cual se le desea comprobar su calidad [11]. El estándar se debe mantener bajo condiciones que preserven su potencia durante todo su uso. Hasta el fin del ensayo, el estándar debe ser almacenado bajo condiciones diferentes

al producto a analizar, por ejemplo, a diferente temperatura, en distintos frascos y a diferente formulación. También debe ser recalibrado contra un Material de Referencia Internacional para evaluar la validez de los valores de actividad biológica asignados en la calibración inicial. De esta forma se detectan problemas que podrían determinar la aptitud o no del MR para continuar con su uso [6].

Cálculo de la Potencia biológica

La actividad o potencia biológica son los efectos de una droga sobre un sistema biológico, los cuales pueden ser benéficos o adversos. Generalmente depende de la dosis en la que se aplica el fármaco.

El cálculo de la potencia biológica es el método utilizado para medir la calidad del fármaco en los ensayos de actividad biológica. Este se realiza a partir de los datos que se obtienen en los ensayos biológicos *in vitro*. Todo el análisis se hace mediante métodos estadísticos de Líneas Paralelas (LP). En este tipo de análisis, el título de la muestra se obtiene mediante la comparación de la curva dosis-respuesta de la muestra con la del estándar utilizado (figura 4) [26]. Por la variabilidad inherente de los ensayos biológicos, la potencia no es una medida absoluta y es calculada preferiblemente por la comparación con un MR.

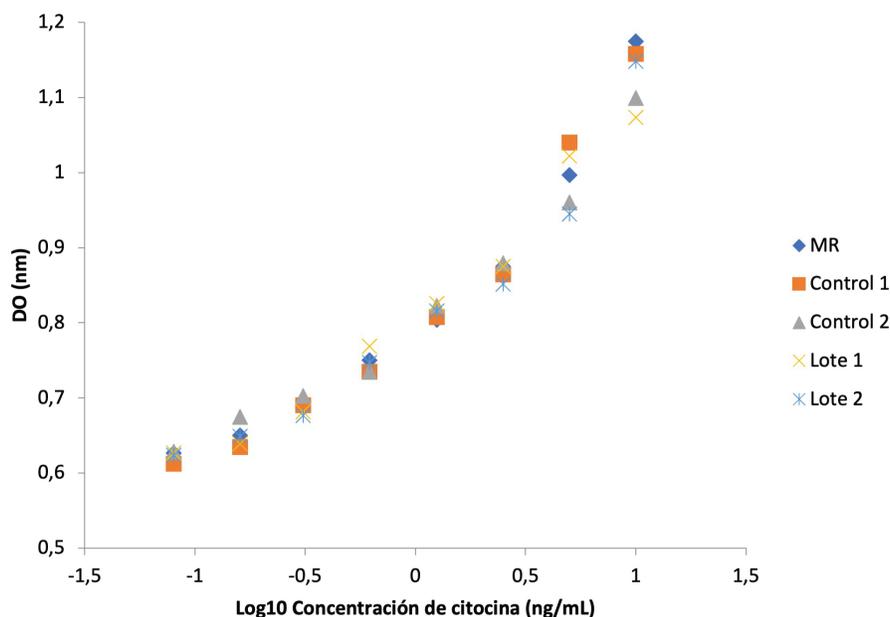


Figura 4. Curva dosis-respuesta obtenida en un EB *in vitro* donde se observa el comportamiento del fármaco (Lote 1 y 2), el Material de Referencia (MR) y Controles Positivos 1 y 2.

Cumplimiento de paralelismo

La prueba de paralelismo es una premisa indispensable para este tipo de cálculo. La muestra a evaluar se debe comportar como si fuese una dilución del MR. Es decir, que la función dosis-respuesta de uno pueda ser considerada como una magnificación del otro [55]. El cálculo de los resultados de cada ensayo consiste en ajustar las funciones logaritmo dosis contra transformación de la respuesta a rectas paralelas. La transformación de la respuesta se realiza para lograr linealizar la función dosis-respuesta [56].

El hecho de que los ensayos cumplan con el paralelismo, significa que los valores de potencia biológica obtenidos para las muestras analizadas puedan ser reportados [4]. El paralelismo es esencial para la validez del ensayo porque implica que la relación entre las dosis que producen un mismo efecto se mantiene constante con la dosis [57, 58]. De no ser así, no se podría definir la potencia, porque sería diferente para cada dosis [55]. El paralelismo mide que la respuesta de la muestra y el MR son iguales excepto por un factor. Eso es lo que se conoce como “Ensayo de Dilución” [4].

El paralelismo se evalúa mediante la comparación de la varianza residual del ajuste a rectas con una pendiente común con la varianza residual del ajuste a rectas con pendientes diferentes. Si las rectas no se apartan significativamente del paralelismo, el aumento de la varianza residual por emplear una pendiente común no será significativo [4]. Esta premisa se basa en la suposición de que tanto las muestras utilizadas como el MR muestran un comportamiento similar, debido a que contienen el mismo analito específico [4]. Por tanto, las curvas dosis-respuesta deben compartir parámetros comunes y solo deben diferenciarse en el desplazamiento horizontal [55]. Si no existiera paralelismo, no se podría interpretar el valor de potencia obtenido, lo que convierte a esta premisa en una condición indispensable para el cálculo de la potencia relativa de una sustancia mediante un ensayo de actividad biológica [4].

El paralelismo se evalúa sólo en el método de líneas paralelas. Para hablar de paralelismo, es necesario que las DO puedan ajustarse en función de la dosis a través de una línea recta, ya sea directamente o después de una transformación. Como la potencia se calcula como la exponencial de la diferencia de intercepto entre las pendientes, la estimación de los límites de confianza sólo será válida si se cumple la linealidad [55].

Cumplimiento de la linealidad

Para determinar si se cumple la linealidad se compara la varianza residual de la regresión con la varianza entre réplica (error puro). Si la varianza residual de la regresión no es significativamente mayor que la varianza entre réplicas, se considera que la regresión es lineal [55].

Por tanto, estos modelos presuponen linealidad de una relación dosis-respuesta. Una característica de los ensayos biológicos es que el comportamiento de la respuesta celular en función de la concentración no es una línea recta, por tanto, los datos obtenidos se deben ajustar mediante una regresión lineal. Una estrategia, para superar esta premisa consiste en seleccionar una región de la curva que sea lineal [4]. Debido a esto, la linealidad es indispensable para que sean válidos los cálculos estadísticos.

Análisis Estadístico

Gráficos de control en los ensayos de actividad biológica

Los gráficos de control constituyen una herramienta para asegurar que los ensayos se mantienen bajo control estadístico. Un requisito indispensable para tomar los ensayos como válidos es que el valor de potencia obtenido para los controles positivos se encuentre entre las ± 3 DS (Desviación estándar) [59]. Otra condición que indica que el ensayo se encuentra bajo control estadístico es el comportamiento de los valores de potencia obtenidos de los controles [4]. Estos se construyen tomando en cuenta los valores de potencia biológica del fármaco evaluado obtenidos en ensayos en años anteriores y comparándolos con los valores actuales. El objetivo principal es asegurarse de que el comportamiento de la actividad biológica del fármaco se encuentra dentro de los límites establecidos (± 3 DS del valor medio reportado)

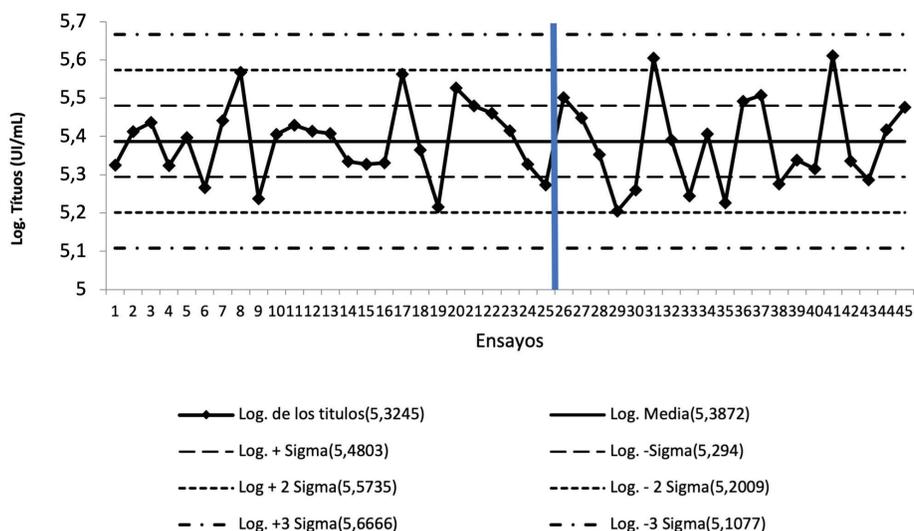


Figura 5. Logaritmo de los valores de potencia obtenidos en los ensayos de actividad biológica para un control positivo. Los valores que se reportan para los primeros 25 ensayos fueron obtenidos durante un tiempo. A partir del ensayo 25 se reportan los valores nuevos.

Conclusiones

- Las citocinas son proteínas con diversas funciones en el organismo, las cuales son utilizadas como ingrediente activo de numerosos fármacos; que antes de ser comercializados deben pasar por una rigurosa revisión de calidad realizada mediante ensayos biológicos *in vitro*.
- En los ensayos biológicos *in vitro*, suelen influir una serie de factores como: contaminaciones, diseño de la placa de cultivo y manejo de las células; los cuales deben mantenerse bajo un estricto control.
- Durante los ensayos *in vitro*, la potencia biológica del fármaco es calculada tomando como base un material de referencia con el mismo ingrediente activo, por lo que se asume que deben seguir el mismo comportamiento.
- Los gráficos de control constituyen una herramienta que permiten visualizar si el comportamiento del fármaco analizado se mantiene entre los umbrales deseados y bajo control estadístico.

Referencias

- [1] S. P. Commins, B. Larry y J. W. Steinke, "Immunologic messenger molecules: Cytokines, interferons and chemokines," *Allergy Clin Immunol J.* 125 (2), 53-72, 2009.
- [2] G. E. Feria, C. A. Leyva, W. Concepción, A. G. Castro y I. S. Larrea, Meza, "Papel de las citoquinas en la fisiopatología de la artritis reumatoide," *Correo Científico Médico*, 24(1), 2020. <http://www.revcoomed.sld.cu/index.php/cocmed/article/view/3447/1778>
- [3] G. Scapigliati, F. Buonocore y M. Mazzini, "Biological Activity of Cytokines: An Evolutionary Perspective", *Current pharmaceutical design*, 12, 3071-81, 2006.
- [4] United States Pharmacopeia, Design and analysis of biological Assays (111), pp 108-120; (1010) Analytical Data-Interpretation and treatment, pp. 378-388, vol.1. (2014)

- [5] A. Mire-Sluis, y T. Gerrard, "Biological Assays: Their role in the development and Quality control of Recombinant Biological Medicinal Products", *Biologicals*, 24(3-4), 351-362, 1996.
- [6] R. S. Schrock, "Cell-Based Potency Assays: Expectations and Realities", *BioProcessing J.*, 11(3), 4-12, 2012.
- [7] P.Y. Kunz, C. Kienle, M. Carere, N. Homazava y R. Kase, "In vitro bioassays to screen for endocrine active pharmaceuticals in surface and waste waters". *Pharm Biomed. Anal. J.*, 106, 107-115, 2015.
- [8] L. Di, "Effects of Properties on Biological Assays", in: *Drug-Like Properties: Concepts, structure Design, and Methods*, pp 487-496, 2016.
- [9] C. Kienle, R. Kase y I. Werner, "Evaluation of bioassays and wastewater quality: In vitro and in vivo bioassays for the performance review in the Project" "Strategy MicroPoll", Swiss Centre for Applied Ecotoxicology, Eawag-EPFL, Duebendorf, 2011.
- [10] C. Woo, K. M. Park, S. Jun y P. S. Chang, "A reliable and reproducible method for the lipase assay in an AOT/isooctane reverses micellar system: Modification of the cooper-soap colorimetric method", *Food Chemistry*, 182, 236-241, 2015.
- [11] A. Mire-Sluis y L. Page, "Quantitative cell line based bioassays for human cytokines". *J. Immunol. Methods*, 187, 191-199, 1995.
- [12] A. Kumar y R. Sheela, "Longer period of oral administration of aspartame on cytokine response in Wistar albino rats", *Endocrinol Nutr.*, 62(3), 114-122, 2015.
- [13] A. Mire-Sluis y R. Thorpe, "Quantitative biological assays using cytokine responsive cell lines", *J. Immunol. Methods*, 123, 150-175, 1996.
- [14] C. M. Barros, R. K. Sakata, A. M. Issy, L. R. Gerola y R. Salomao, "Cytokines and Pain", *Rev Bras Anestesiol*, 61(2), 255-265, 2011.
- [15] Z. Díaz, M. Rodríguez, J. P. Yáñez, C. Álvarez, C. Rojas, A. Benítez, P. Ciuchi, G. monasterio y R. Vernal, "Variabilidad de la síntesis de citoquinas por células dendríticas humanas estimuladas con los distintos serotipos de *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*", *Rev. Clin. Peridonia Implantol. Rehabil. Oral*, 6(2), 57-56, 2013.
- [16] R. Velázquez, G. Gutiérrez, M. Urbán, N. Velázquez, T. I. Fortoul, A. Reyes y A. Consuelo, "Perfil de citosinas proinflamatorias y antiinflamatorias en pacientes pediátricos con síndrome de intestino irritable". *Rev. de Gastroenterología de México*, 80(1), 6-12, 2015.
- [17] G. T. López, M. L. P. Ramírez y M. S. Torres, "Participantes de la respuesta inmunológica ante la infección por SARS-CoV-2", *Alergia, asma e inmunología*, 29(1), 5-15, 2020.
- [18] U. Solis y J. P. Martinez, "Opciones terapéuticas al síndrome de liberación de citocinas en pacientes con la COVID-19". *Revista Cubana de Medicina Militar*, 49(3), e0200783.
- [19] M. M. Katsicas, "Tormenta de citoquinas y tormenta de información asociadas a COVID-19: consideraciones sobre el síndrome inflamatorio multisistémico en niños", *Arch Argent Pediatr*, 119(1), 4-5, 2021.
- [20] L. M. Filgueira, J. B. Cervantes, O. A. Lovelle, C. Herrera, C. Figueredo, J. A. Caballero, et al., "An anti-CD6 antibody for the treatment of COVID-19 patients with cytokine-release syndrome: report of three cases", *Immunotherapy*, 13(4), 289-95, 2021.
- [21] C. A. Dinarello, "Historical insights into cytokines". *Eur J. Immunol.* 37: 34-45, 2007.
- [22] F. G. Khallaf, E. O. Kehinde y A. Mostafa "Growth factors and cytokines in patients with long bone fractures and associated spinal cord injury", *J. of Orthopaedics*, 13(2), 69-75, 2016.
- [23] R. A. Brashaw, R. Fujii, H. Hondemarck, S. Raffioni, Y. Wu y M. A. Yarski, "Polypeptide growth factors: Structure, function and mechanism of action", *Pure & Appl. Chem.*, 66 (1), 9-14, 1994.
- [24] L. A. Díaz, Concheiro, C. Álvarez y C. A. García, "Growth factors delivery from hybrid PCL-starch scaffolds processed using supercritical fluid technology", *Carbohydrate Polymers*, 142, 282-292, 2016.
- [25] C. M. G. Silva, S. V. Castro, L. R. Faustino, C. Q. Rodríguez, I. R. Brito, R. Rossetto, M. V. A. Saraiva, C. C. Campello, C. H. Lobo, C. E. A. Souza, A. A. A. Moura, M. A. M. Donato, C. A. Peixoto y J. R. Figueiredo, "The effects of epidermal growth factor (EGF) on the in vitro development of isolated goat secondary follicles and the relative mRNA expression of EGF, EGF-R, FSH-R and P450 aromatase in cultured follicles", *Research in Veterinary Science*, 94 (3), 453-461, 2013.
- [26] H. Gerónimo, "Establecimiento y Validación de Ensayos de Actividad Biológica para factores de crecimiento y citocinas, aplicados a la producción de Heberprot-P, IL-2 e IL-15", Tesis de maestría, Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología, 2009.

- [27] D. Li, R. Zang, S. T. Yang, J. Wang y X. Wang, "Cell-based high-throughput proliferation and cytotoxicity assays for screening traditional Chinese herbal medicines", *Process Biochemistry*, 48(3), 517-524, 2013.
- [28] A. Jain, R. Jain y S. Jain, "Purification and Bioassay of Interleukin-1 and Interleukin-2 (IL-1 and IL-2)", in: *Basic Techniques in Biochemistry, Microbiology and Molecular Biology*, Springer Protocols Handbooks. Humana, New York, NY, 2020. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9861-6_26.
- [29] M. Walz, C. Höflich, C. Walz, D. Ohde, J. Brenmoehl, M. Sawitzky, A. Vernunft, U. K. Zettl, S. Holtze, T. B. Hildebrandt, et al., "Development of a Sensitive Bioassay for the Analysis of IGF-Related Activation of AKT/mTOR Signaling in Biological Matrices", *Cells*, 10(482), 2021. <https://doi.org/10.3390/cells10030482>.
- [30] F. Pujol, N. Vigués, A. Guerrero, S. Jiménez, D. Gómez, M. Fernández, J. Bori, B. Valles, M. C. Riva, X. Muñoz y J. Mas, "Paper-based chromatic toxicity bioassay by analysis of bacterial ferricyanide reduction", *Analytica Chimica Acta*, 910, 60-67, 2016.
- [31] C. Darne, C. Coulais, F. Terzetti, C. Fontana, S. Binet, L. Gaté y Y. Guichard, "In vitro comet and micronucleus assays do not predict morphological transforming effects of silica particles in Syrian Hamster Embryo cells". *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 796, 23-33, 2016.
- [32] F. A. Groothuis, M. B. Heringa, B. Nicol, J. L. M. Hermens, B. J. Blaauboer y N. I. Kramer "Dose metric consideration in in vitro assays to improve quantitative in vitro-in vivo dose extrapolations", *Toxicology*, 332, 30-40, 2015.
- [33] S. Wang, J. M. M. J. G. Aarts, N. M. Evers, A. A. C. M. Peijnenburg, I. M. C. M. Rietjens y T. F.H. Bovee, "Proliferation assays for estrogenicity testing with high predictive value for the in vivo uterotrophic effect", *J. Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 128 (3-5), 98-106, 2012.
- [34] G. Eisenbrand, B. Pool-Zobel, V. Baker, M. Balls, B. J. Blaauboer, A. Boobis, A. Carere, S. Kevekordes, J. C. Lhuguenot, R. Pieters, J. Kleiner, "Methods of in vitro toxicology", *Food and Chemical Toxicology*, 40, 193-236, 2002.
- [35] S. Rubinstein, P. C. Familletti y S. Pestka, "Convenient assay for interferons", *J. Virol.*, 37, 755-758, 1981.
- [36] J. H. Fentem, "The use of human tissues in in vitro toxicology, Summary of general discussions", *Human Experimental Toxicology*, 13(2), 445-449, 1994.
- [37] M. Repetto, "*Toxicología Fundamental. Métodos alternativos, Toxicidad in vitro*", Sevilla, España: Ediciones Díaz de Santos, Enpses-Mercie Group, Tercera edición, pp.303-305, 2002.
- [38] P. Liu, K. Zhang, R. Zhang, H. Yin, Y. Zhou y S. Ai, "A colorimetric assay of DNA methyltransferase activity based on the keypad lock of duplex DNA modified meso-SiO₂@Fe₃O₄", *Analytica Chimica Acta*, 920, 80-85, 2016.
- [39] L. Ramírez y L. Lozano, "Principios físicoquímicos de los colorantes utilizados en microbiología Principios físicoquímicos de los colorantes", *Nova*. 18, 2020. <https://doi.org/10.22490/24629448.3701>.
- [40] S. A. Aaronson y G. J. Todaro, "Development of 3T3-like lines from BALB/c mouse embryo cultures. Transformation susceptibility to SV-40", *J. Cell Physiol.*, 72, 141-148, 1968.
- [41] T. Mosmann, "Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assay", *J. Immunol. Methods*, 65, 55-63, 1983.
- [42] F. Denizot y R. Lang, "Rapid colorimetric assay for cell growth and survival, Modifications to the tetrazolium dye procedure giving improved sensitivity and reliability", *J. Immunol. Methods*, 89, 271-277, 1986.
- [43] N. Diaz, A. Nicolau, G. S. Carvalho, M. Mota y N. Lima, "Miniaturization and application of the MTT assay to evaluate metabolic activity of protozoa in the presence of toxicants", *J. Basic Microbiol.*, 39(2), 103-108, 1999.
- [44] C. Y. Sasaki y A. Passniti, "Identification of anti-invasive but noncytotoxic chemotherapeutic agents using the tetrazolium dye MTT to quantitative viable cells in matrigel", *Bio-Techniques*, 24, 1038-1043, 1998.
- [45] M. S. Quesada, "Determinación de la actividad antioxidante y el efecto citotóxico sobre líneas celulares tumorales de un extracto rico en polifenoles del fruto *Bactris guineensis*", Tesis de Maestría. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica, 2020.
- [46] T. Gessner y U. Mayer, "Triarylmethane and Diarylmethane Dyes", Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6th ed, 2002.
- [47] D. A. Joelsson, "Practical Guide to Design of Experiments (DOE) for Assay Developers", 2012.
- [48] R. I. Freshney, "Culture of Animal cells Freshney: A manual of Basic Technique and Specialized Applications", 163 pp, 2010.
- [49] S. Coecke, M. Balls, G. Bowe, J. Davis, G. Gstraunthaler, T. Hartung, R. Hay, O. W. Merten, A. Price, L. Schechtman, G. Stacey y W. Stokes, "Guidance on Good Cell Culture Practice", *ATLA*, 33, 261-287, 2006.

- [50] G. Stacey, "Cell lines used in the manufacture of biological products, in *Encyclopedia of Cell Technology*", Spier, R., Ed., Wiley Interscience, New York, pp. 79–83, 2000.
- [51] N. Rieder, H. Gazzano-Santoro, M. Schenerman, R. Strause, C. Fuchs, A. Mire-Sluis y L. D. McLeod, "The Roles of Bioactivity Assays in Lot Release and Stability Testing", *BioProcess International*, 8(6), 33-42, 2010.
- [52] G. Stacey, "Fundamental Issues for Cell-Line Banks in Biotechnology and Regulatory Affairs", *Cell Biology*, NIBSC, South Mimms, UK, 2004.
- [53] R. J. Hay, "ATCC Quality controls methods for cell lines". American Type Culture collection, Rockville MD, 1985.
- [54] G. N. Stacey y A. Doyle, "Cell banking, in *Encyclopedia of Cell Technology*", Spier, R., Ed., Wiley Interscience, New York, pp. 293–320, 2000.
- [55] D. J. Finney, "Statistical Methods in Biological Assays", Ed. Griffin, 1964.
- [56] A. Rosso, "Statistical analysis of experimental designs applied to biological assays", Master thesis, School of Economics and management, 2010.
- [57] D. M. Rocke, "Design and analysis of experiments with high throughput biological assay data", *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 15, 703, 2004.
- [58] D. Lansky, "Strip-Plot Designs, Mixed Models, and Comparisons Between Linear and Nonlinear Models for Microtitre Plate Bioassays in the Design and Analysis of Potency Assays", *Dev. Biol*, 107, 11–23, 2002.
- [59] C. P. Quesenberry, "The effect of sample size on estimated limits for and X control charts", *J. Quality Technology*, 25(4), 237-247, 1993.

Obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y bagazo de caña

Nanocellulose production from African oil palm rachis and sugarcane bagasse

Eddy Gabriel Jirón-García¹, Karina Rodríguez-Mora²,
Cesar Bernal-Samaniego³

Fecha de recepción: 9 de febrero de 2021
Fecha de aprobación: 13 de junio de 2021

Jirón-García, E.G; Rodríguez-Mora, K; Bernal-Samaniego, C. Obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y bagazo de caña. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 167-181.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5609>



- 1 Investigador. Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, Sede del Caribe. Costa Rica. Correo electrónico: eddy.jiron@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7524-9033>
- 2 Investigador. Unidad de Recursos Forestales, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Investigador. Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, Sede del Caribe. Costa Rica. Correo electrónico: karina.rodriguez mora@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9660-4623>
- 3 Investigador. Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, Sede del Caribe. Costa Rica. Correo electrónico: cesar.bernal@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7891-7618>

Palabras clave

Biomasa; materiales; nanocelulosa; residuos; degradación.

Resumen

Se utilizó raquis de palma africana y bagazo de caña como materias primas para obtener nanofibrillas de celulosa por medio de un método híbrido combinando un tratamiento químico y una ruptura mecánica. La celulosa obtenida de ambas materias primas, luego de la hidrólisis fue caracterizada por Espectroscopía Infrarroja, Análisis Termogravimétrico, Microscopía Electrónica de Barrido, Microscopía de Fluorescencia y Difracción de rayos X. Se realizó una Microscopía Electrónica de Transmisión a las nanofibrillas para determinar el tamaño de las mismas. Se observó un porcentaje de remoción de lignina de 74,1 % para el raquis de palma africana y de 65,6 % para el bagazo de caña luego del tratamiento químico; lo que generó microcelulosa de 6-12 μm y de 10-18 μm para el raquis y el bagazo respectivamente. La ruptura mecánica con el sonificador de alta potencia produjo nanofibrillas de 19-24 nm para el raquis de palma y de 9,22-12 nm para el bagazo de caña; con un Índice de Cristalinidad de 70% en ambos casos.

Keywords

Biomass; materials; nanocellulose; waste; degradation.

Abstract

African oil palm rachis and sugarcane bagasse were used as raw materials to produce cellulose nanofibrils by hybrid method which combine chemical treatment and mechanical rupture. The cellulose obtained from both raw materials after hydrolysis was characterized by Infrared Spectroscopy, Thermogravimetric Degradation Analysis, Scanning Electron Microscopy, Fluorescence Microscopy and X-ray Diffraction. At the end of the mechanical rupture, Transmission Electron Microscopy was performed at the nanofibrils to determine their size. A lignin removal percentage of 74,1 % was observed for the african oil palm rachis and 65,6 % for the sugarcane bagasse after chemical treatment; which generated microcellulose of 6-12 μm and 10-18 μm for the rachis and bagasse respectively. The mechanical rupture treatment with the high-power sonifier produced nanofibrils of 19-24 nm for the palm rachis and 9,22-12 nm for the cane bagasse; with a Crystallinity Index of 70% in both cases.

Introducción

La economía costarricense basa uno de sus pilares en la agronomía y el cultivo. Según la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019 publicada en setiembre de 2020 el café, la palma africana y la caña de azúcar son los cultivos que más área abarcaron en el territorio nacional durante el 2019. Estos productos agroindustriales, según la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA) en su Boletín Estadístico N°30, mantuvieron esta tendencia para el primer semestre de 2020.[1], [2].

En concordancia con lo anterior, la producción de aceite de palma fue estimada por la ENA en aproximadamente 1 033 721 toneladas métricas para el 2019 con una productividad promedio a nivel nacional de 14,37 toneladas métricas de fruta fresca por hectárea por año. Al procesar la fruta fresca se genera un residuo sólido de alrededor de 21 % en peso de la fruta que incluyen la fibra, el cuesco y el raquis [3], cuya disposición se da principalmente en patios de descomposición para ser utilizados como compostaje, en biodigestores [4] y en ocasiones se

incinera para usarse como combustible [1], [5], [6]. Aunque, el raquis normalmente no se utiliza en el aprovechamiento energético, ya que contienen mucha humedad y su volumen lo hacen difícil de transportar, por lo que se hacen necesarias buscar alternativas que generen valor a este residuo [7].

De igual manera, la producción de azúcar se incrementó de 431 109 toneladas métricas en el periodo 2017/2018 a 445 000 toneladas métricas en el mismo periodo 2018/2019 [8] este aumento se debe a que en el procesamiento de la caña de azúcar en Costa Rica participan en forma activa 13 ingenios azucareros distribuidos a lo largo de todo el país [9]. La totalidad de esa caña que se procesa en los ingenios, generó una cantidad aproximada de 624 mil toneladas de bagazo de caña seco, convirtiendo este residuo en el más importante de la industria [10], [11]. Al igual que la palma, este residuo es utilizado para producir energía por medio de su incineración, pero dependiendo del manejo de la producción agroindustrial esto puede resultar en un aumento de emisiones; por lo que se ha optado por buscar alternativas más limpias para aprovecharlo [12].

En consecuencia, tanto el raquis de palma africana como el bagazo de caña se han convertido en materias primas importantes para el estudio de productos de mayor valor agregado y con mayor interés científico debido a su composición química y propiedades.

El bagazo es un residuo fibroso remanente de los tallos de caña, que se obtiene a la salida del último molino del tándem azucarero, el cual constituye un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños que oscilan entre 1 a 25 mm, presentando una fracción promedio de aproximadamente 20 mm. Desde el punto de vista químico se compone de 46,6 % de celulosa, 25,2 % de hemicelulosas y 20,7 % de lignina en base húmeda [10], [13].

Debido a las características anteriores, el bagazo de caña ha sido utilizado de diversas formas aprovechando que es un recurso ecológico y renovable, entre ellas están, a parte de la generación eléctrica, la producción de pulpa de papel y productos basados en la fermentación (como etanol de segunda generación) [14].

Por otra parte, los residuos de palma africana (*Elaeis guineensis*) son varios e incluyen características similares en cuanto a composición. El raquis de palma, por ejemplo, posee una composición química heterogénea basada principalmente en tres biopolímeros que constituyen entre un 95 % - 98 % de su composición: celulosa, hemicelulosa y lignina. El restante 2 % - 5 % los constituyen moléculas de bajo peso molecular llamadas extractivos [15].

De los biopolímeros que conforman tanto el raquis de palma africana como el bagazo de caña de azúcar, uno de los más importantes en su composición es la celulosa [10], [15]. La celulosa y la lignina son los mayores constituyentes de las paredes celulares vegetales, por esta razón a los residuos provenientes de las plantas se les conoce como residuos lignocelulósicos [16], [17].

En los últimos años las investigaciones se han enfocado en la creación de materiales de mayor valor agregado a partir de materiales lignocelulósicos por medios innovadores que permitan un proceso más ecológico y al mismo tiempo de menor costo, por ejemplo la obtención de micro y nanocelulosa [16], [18], [19]. En consecuencia, en Costa Rica se han realizado investigaciones acerca de la obtención de nanocelulosa a partir de residuos de la piña, del banano, de la caña de azúcar, y de la palma africana [20]–[23]. Reforzamiento de poliuretanos elastoméricos con fibras naturales y microcelulosa para influir en las propiedades mecánicas [24], micro y nanocelulosa como reforzante para adhesivos de polivinilacetato y úrea-formaldehído [25], así como aditivo en mezclas para materiales de construcción [26] son algunos usos que se le ha dado.

La nanocelulosa es la forma nanométrica de la celulosa, la cual puede presentarse principalmente en tres formas: 1) celulosa nanocristalina (CNCs o NCCs) y nanocilindros de celulosa (CNWs) 2) nanofibrillas de celulosa (CNFs o NFC) y 3) celulosa bacteriana (BC). Por lo tanto se obtienen materiales con diferente cristalinidad, superficie química y propiedades mecánicas, haciéndolos atractivos en investigación [23], [27], [28].

Entre los procesos de obtención de nanocelulosa cristalina y nanofibrillas se encuentra la oxidación TEMPO (2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxilradical), hidrólisis enzimática o métodos mecánicos incluyendo ultrasonificación de alta intensidad, la homogenización de alta presión o molienda [23], [29]–[31]. Aunque el proceso más común es la hidrólisis de la pulpa, que puede ser ácida o alcalina, que remueve los componentes no celulósicos y las partes amorfas de las cadenas de celulosa.

Gran cantidad de trabajos se han llevado a cabo por medio de hidrólisis, Mandal y Chakrabarty [32] sintetizaron nanofibrillas de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar. Habibi [33], sintetizó nanofibrillas de celulosa con una dimensión de 10-30 nm y cientos de nanómetros de longitud. Además, por medio de la mezcla de HCl y HNO₃ se han obtenido nanocristales de celulosa con excelente dispersión en agua [34].

Este artículo plantea la obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y de bagazo de caña por medio de un método híbrido que combina un tratamiento de explosión a temperatura y presión moderadamente elevadas; utilizando una combinación de hidrólisis básica con NaOH y una hidrólisis ácida usando CH₃COOH, y una ruptura mecánica de la pulpa de celulosa por medio de un sonificador de alta potencia.

Materiales y métodos

Obtención de nanocelulosa

Degradación

La muestra se seca y se muele a un tamaño de 10 mm aproximadamente, se agrega NaOH al 2 % (m/m) en una relación de 100 g por 3 L de disolución. Se somete a 150 lb de presión por 30 min. Se retira y se lava hasta pH neutro. La masa resultante se somete nuevamente a 100 lb de presión por 30 min utilizando ácido acético al 6 % (m/m). Se decanta y se lava con hipoclorito de sodio durante 30 min cambiando el hipoclorito cada 15 min. Finalmente, se lava hasta pH neutro.

Ruptura

La celulosa obtenida se coloca diluida en un sonificador de alta potencia marca QSonica modelo Q700, la cual utiliza una amplitud del 60%, 20MHz y 15 minutos en un baño de agua para evitar el calentamiento. Posteriormente, la nanocelulosa se centrifuga.

Caracterización

Caracterización química

- Extractivos, lignina, holocelulosa, hemicelulosa, celulosa y cenizas: se determinaron de acuerdo con las normas TAPPI, las normas empleadas fueron T 207 cm-99, T 413 om-02, T 222 om-02, T 280 pm-99 y T 203 cm-99.

Caracterización microscópica y espectroscópica

- **Espectroscopia Infrarroja (IR):** para obtener las bandas de los grupos funcionales asociados a los componentes de la fibra, así como ausencia y presencia de lignina se utilizó un equipo PerkinElmer modelo Frontier FT-IR-ATR. Se hicieron 10 escaneos por muestra con un fondo grande para obtener el espectro final. El escaneo fue desde 4000 cm^{-1} a 450 cm^{-1} .
- **Análisis Termogravimétrico (TGA):** se utilizó un equipo TGA TA-Instruments Q5000 con un flujo de Nitrógeno ultrapuro de 10 mL/min utilizando una rampa de calentamiento de 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ desde 25 $^{\circ}\text{C}$ hasta 600 $^{\circ}\text{C}$ para obtener la degradación específica de cada compuesto por medio del área bajo la curva.
- **Microscopia de fluorescencia:** Para la determinación del cambio en la composición entre lignina y celulosa se empleó un microscopio de fluorescencia marca Zeiss modelo Axio Lab, Para la determinación de la celulosa se tiñó la fibra con M2R calcoflur al 0,01 % por 5 minutos, se dejó secar al aire y en la oscuridad por 24 horas, mientras que la medida de lignina se realizó por autofluorescencia.
- **Microscopía electrónica de barrido (SEM):** Se empleó un microscopio electrónico de barrido HITACHI modelo S700-N para determinar cambios morfológicos según el tratamiento por medio de microfotografías a las fibras. Para esto, las fibras secas fueron colocadas en una cinta de carbono doble contacto y se realizó un recubrimiento con oro al vacío para finalmente ser colocadas en el microscopio electrónico.
- **Microscopía electrónica de transmisión (TEM):** para determinar el tamaño de las fibras de nanocelulosa se utilizó un Microscopio Electrónico de Transmisión HITACHI HT 7700. Las fibras fueron suspendidas en agua destilada y posteriormente se colocó una microgota sobre una rejilla de carbono, se dejó secar al aire y se realizó una tinción negativa con ácido fosfotungstíco para finalmente ser colocadas al microscopio electrónico.
- **Difracción de Rayos X (XRD):** Se utilizó un difractómetro de rayos X PANalytical modelo Empyrean para determinar la relación entre el tratamiento empleado y la cristalinidad de las muestras. Las muestras fueron colocadas en un portamuestras Zer-background y luego dentro de una cuna tipo reflexión-transmisión. El análisis de Difracción se realizó con un tubo de Cobre ($\lambda=1,54 \text{ \AA}$) a una potencia de 45 kV y 40 mA, con un barrido de 5 $^{\circ}$ - 60 $^{\circ}$. Para el filtrado de radiación K β se utilizó un filtro de Niquel.

Resultados y Discusión

Caracterización Química

La caracterización de la materia prima se llevó a cabo con el objetivo de conocer su composición química, de forma tal que se pueda elegir un tratamiento adecuado, que involucre o no un procesamiento previo. El cuadro 1, muestra los resultados de la caracterización tanto del raquis de palma como del bagazo de caña. Entre los componentes de mayor interés para este trabajo se encuentra la lignina y la celulosa presentes en ambas muestras.

Cuadro 1. Caracterización de la materia prima.

Muestra	Cenizas	Extractivos	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa
Raquis Palma	3,87 \pm 0,23	5,42 \pm 0,33	22,6 \pm 1,1	31,4 \pm 1,3	25,8 \pm 1,3
Bagazo de caña	4,59 \pm 0,65	1,52 \pm 0,10	24,0 \pm 2,7	30,4 \pm 1,5	32,1 \pm 1,5

Los dos materiales presentan un alto contenido de lignina si se compara con otros productos como el pinzote de banano y las hojas del rastrojo de piña los cuales poseen 15,6 % y 15,9 % respectivamente [23], [35]. Además, es importante destacar que todas estas muestras no presentaron un pre-tratamiento mecánico que las llevara a un tamaño de partícula homogéneo ni que fuera realmente pequeño haciendo que el proceso de degradación sea más complejo y como consecuencia de ello se ve la necesidad de emplear el método de explosión a mayores presiones (150 lb de presión en la hidrólisis básica y 100 lb de presión en la hidrólisis ácida), de forma tal que las concentraciones de los reactivos se puedan mantener relativamente bajas (NaOH al 5 % y CH_3COOH al 6 %).

Las concentraciones de los reactivos utilizados en la explosión son menos concentrados y menos dañinas al medio ambiente que otros utilizados en el mismo método para materias primas iguales o con un contenido de lignina similar que utilizan NaOH entre 20-25 % para la hidrólisis básica, y para la hidrólisis ácida pueden usar H_2SO_4 entre 10-75 % o HCl entre 10-17 % [20], [36].

En cuanto al contenido de celulosa, se nota que ambos materiales poseen una composición similar. Este valor se asemeja al reportado para otros productos como el raquis de banano y la cascarilla de café los cuales poseen 33,5 % y 25,7 % respectivamente. No obstante es menos que el reportado para las hojas del rastrojo de piña que ronda el 62 % [23], [36], [37]. Sin embargo, la diferencia en la extracción de celulosa de todos estos materiales radica en el contenido de lignina y en la disposición y arreglo de las fibras a nivel microscópico.

Espectroscopía Infrarroja (IR)

La figura 1 muestra el espectro infrarrojo de la celulosa obtenida tanto del raquis de palma como del bagazo de caña. En ella se muestran diferentes bandas características, por ejemplo, la banda ancha situada a 3324 cm^{-1} corresponde al enlace -OH, característicos de la celulosa y hemicelulosa, la banda de 2890 cm^{-1} que corresponde al estiramiento del enlace -CH en $\text{R}_3\text{C-H}$ y el pico en 1430 cm^{-1} correspondiente al enlace $-\text{CH}_2$, ambos característicos de los compuestos polisacáridos.

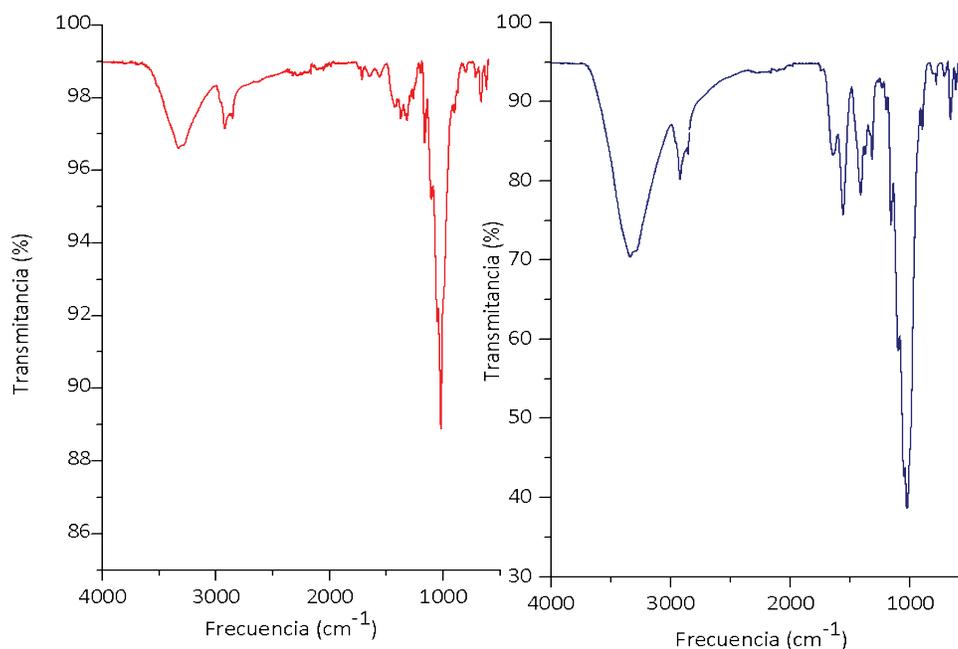


Figura 1. Espectro infrarrojo A) Bagazo de caña B) Raquis de palma africana.

La banda en 1152 cm^{-1} se relaciona con el estiramiento asimétrico C–O–C atribuido a la celulosa. La banda posicionada en 1001 cm^{-1} se atribuye al enlace -CO. Una banda en 896 cm^{-1} surge de los enlaces glicosídicos y es asociada con la parte amorfa de la estructura de la celulosa mientras que la banda a 1420 cm^{-1} es asociada la parte cristalina del material [38], [39]. Estos picos son todas las bandas de absorción características de la celulosa y es importante mencionar se encuentran presentes en ambas muestras.

No obstante, se notan diferencias en las bandas presentadas en 1635 cm^{-1} y 1600 cm^{-1} correspondiente al enlace C=C presente en los compuestos aromáticos. Además de la banda a 1250 cm^{-1} causada por el anillo del benceno presente, todas estas bandas son características de la lignina [20], [23], [40].

Lo que quiere decir que se obtuvo celulosa utilizando tanto bagazo de caña como raquis de palma como materia prima. Sin embargo, el proceso de deslignificación no se efectuó de igual forma en ambas generando al final bandas diferentes en los espectros. Esta diferencia en la deslignificación se puede corroborar en el Análisis Termogravimétrico (TGA) y se debe principalmente a que, a diferencia del raquis de palma, el bagazo de caña presenta una estructura microscópica más laminar que fibrilar (ver figura 5 y figura 6).

Análisis Termogravimétrico (TGA)

En la figura 2 se muestran los termogramas correspondientes a las muestras de celulosa obtenida a partir de bagazo de caña y raquis de palma después de los tratamientos químicos. Los materiales lignocelulósicos normalmente poseen tres caídas de masa en sus diagramas termogravimétricos [41], estas caídas son más notorias en el bagazo de caña que en el raquis de palma africana. La primera caída corresponde a la humedad del material, tanto la humedad externa como la humedad ocluida, por lo cual la rampa de temperatura es de 40 °C hasta los 130 °C . Esta humedad corresponde a un $6,8\%$ para el bagazo de caña y un $4,3\%$ para el raquis de palma africana, de ahí la diferencia entre la primera parte de las curvas. La segunda caída de masa se da cuando se descomponen los carbohidratos presentes en la muestra es decir la holocelulosa (celulosa + hemicelulosa) en un rango de temperatura entre 180 °C y 360 °C [42], correspondiente a un $54,9\%$ para el bagazo de caña y un $61,5\%$ para el raquis de palma africana respectivamente. Es importante mencionar que el amplio rango de descomposición de la holocelulosa se debe principalmente a que los puentes de hidrógeno y regiones cristalinas del material generan una estabilidad térmica importante en las fibras, este intervalo de temperaturas coincide con [43] y [44] quienes estudiaron la influencia de la cristalinidad en la estabilidad térmica de las nanofibras de celulosa de diversos residuos lignocelulósicos.

Finalmente, la última caída de masa en la figura 2 corresponde a la lignina residual en el material después de las hidrólisis y de los blanqueamientos. La lignina al ser un compuesto aromático de alto peso molecular y estructura química variable, se descompone en un intervalo de temperatura amplio entre 390 °C y 580 °C [45], [46].

El cuadro 2 muestra cuánta lignina le quedó al material, al mismo tiempo que se muestra el porcentaje de remoción de lignina con respecto al cuadro 1. Al observar la lignina residual se denota como ocurre mayor degradación en la palma africana, logrado una remoción de un $74,1\%$, mientras que en el bagazo de caña se da una remoción del $65,6\%$. Estos datos se pueden corroborar al observar la microscopía de fluorescencia de la figura 3.

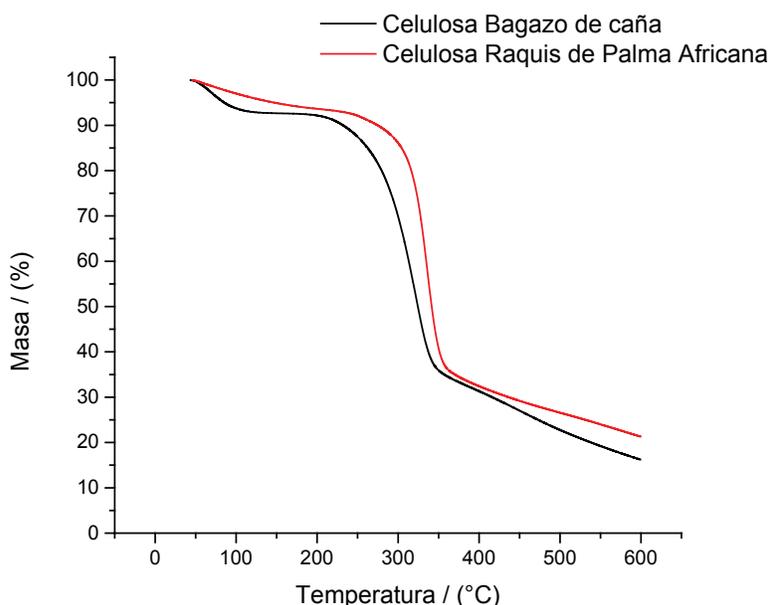


Figura 2. Diagramas termogravimétricos de las pulpas de generadas a partir de bagazo de caña y raquis de palma africana luego del tratamiento químico.

La extracción de celulosa (como se mencionó antes) depende del contenido de lignina y de la disposición y arreglo de las fibras a nivel microscópico. La caña de azúcar presentó mayor porcentaje de lignina en la materia prima, y al ser un compuesto cuya disposición es en láminas y no en fibras a diferencia del raquis de palma africana (ver microscopía electrónica de barrido) se disminuye la deslignificación producida en los tratamientos. No obstante, el porcentaje de remoción de lignina cuantificado con TGA es considerablemente alto, haciendo el método funcional para separar la celulosa de la lignina en ambas materias primas.

Cuadro 2. Resultados del análisis de los TGA.

TGA	Porcentaje Lignina residual (%)	Porcentaje de remoción (%)
Celulosa de Raquis de palma africana	5,8	74,1
Celulosa de bagazo de caña	8,3	65,6

Microscopía de fluorescencia

La microscopía de fluorescencia se utilizó como método para seguir la degradación de la lignina en la muestra y por ende mayor exposición de la celulosa. El calcofluor tiene la capacidad de formar puentes de hidrógeno con polisacáridos β -1,4 y β -1,3 y generar una tinción para localizar celulosa [47]. En la figura 3 se muestra la manera en la que fluoresce la celulosa (azul) y la lignina (verde). En la figura 3.1, se nota una mayor coloración verde lo que significa una mayor concentración de lignina, ya que según [48] y [49] la magnitud de la fluorescencia es proporcional a la concentración de este componente.

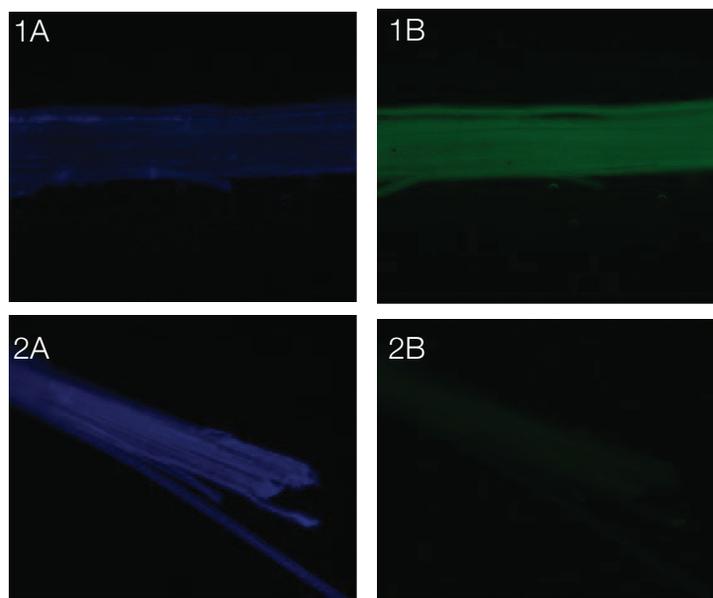


Figura 3. Microscopía de fluorescencia para el bagazo de caña 1A y 1B sin tratamiento, 2A y 2B posterior a la hidrólisis básica (A. Celulosa B. Lignina).

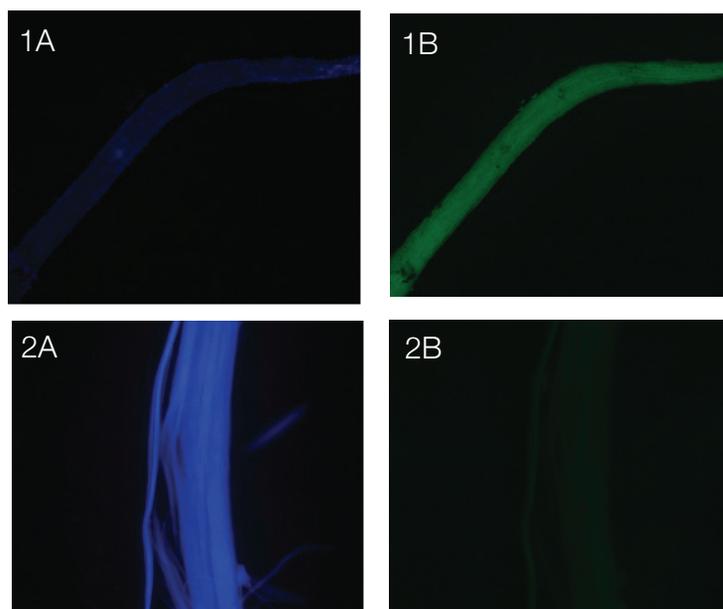


Figura 4 Microscopía de fluorescencia para el Raquis de palma. 1A y 1B sin tratamiento, 2A y 2B posterior a la hidrólisis básica (A. Celulosa B. Lignina).

Lo contrario pasa en la figura 3.2, en la cual el color azul es predominante y la lignina es poco visible, lo que indica que el tratamiento sí funciona para deslignificar el bagazo de caña, por lo tanto, esta figura apoya los resultados obtenidos en el Análisis Termogravimétrico. En el caso del raquis de palma (figura 4) se observa el mismo fenómeno, sin embargo, los cambios se ven con mayor intensidad de tal forma que la celulosa es casi imperceptible antes del tratamiento, pero al realizar la degradación de la lignina con NaOH se expone totalmente la celulosa y ahora, por el contrario, se dificulta observar la presencia de lignina residual en la parte superior de las fibras.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En cuanto al análisis morfológico, se notan grandes diferencias tanto entre los tratamientos como entre las materias primas. La figura 6.1 muestra la manera en la que se separan las fibras de celulosa del raquis de palma, además de que ocurre una reducción en el tamaño de las fibras luego de cada tratamiento. Lo que produce que las fibras de raquis de palma pasen de 75-147 μm después de la hidrólisis básica a 6-12 μm después de la hidrólisis ácida. Esto se debe a que al degradar parte de la lignina y material gomoso que las mantenía unidas se da la separación en fibras más pequeñas.

Por otra parte, la figura 6.2 muestra al bagazo de caña, en el cual la reducción en el tamaño de las fibras es menos evidente, aunque sí se da ya que luego de la hidrólisis básica el tamaño es de 15-27 μm (sección más pequeña) y al finalizar el tratamiento ácido el tamaño disminuye a 10-18 μm . Esta disminución es menor a causa de que en el bagazo de caña no se ven fibras claras sino una especie de láminas, que estas a su vez se deben a la composición de la materia prima, pues si se observa la figura 5 se muestra como el material está compuesto por láminas que, por tanto, al degradarse se da la separación de las mismas, razón por la cual el bagazo degradado no presenta una estructura fibrilar.

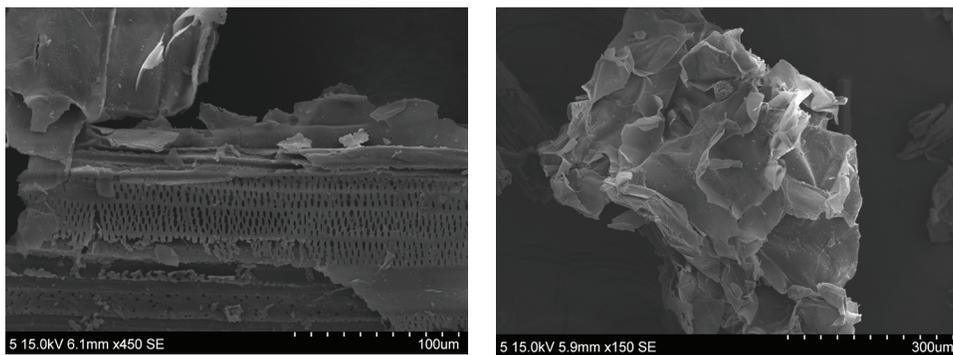


Figura 5. Microscopía electrónica de barrido, de muestra de bagazo de caña sin tratar.

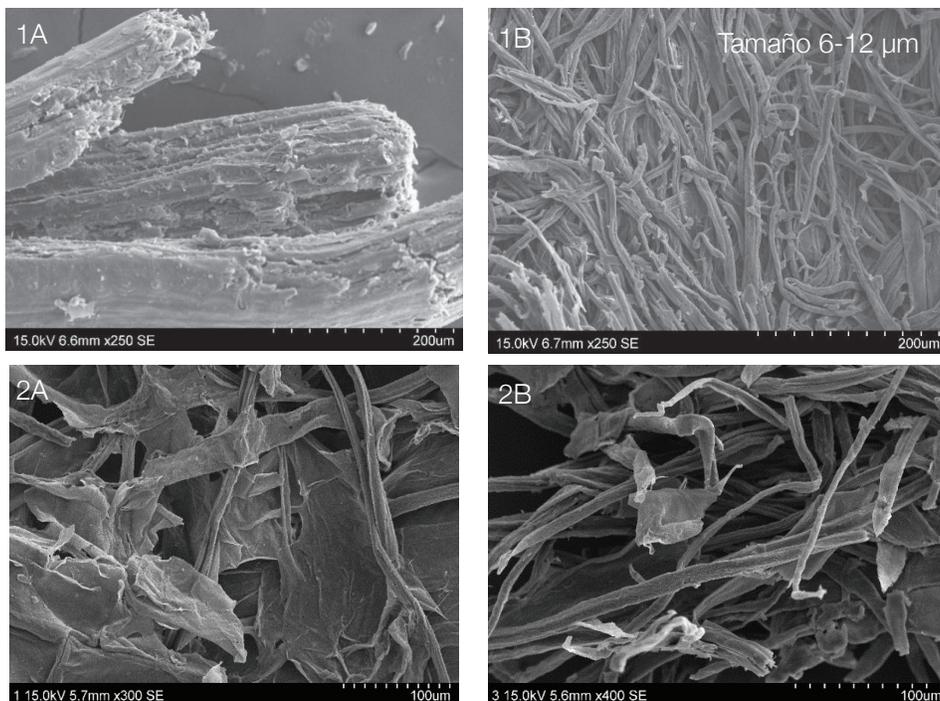


Figura 6. Microscopía electrónica de barrido. 1A y 1B Raquis de palma africana, 2A y 2B Bagazo de caña (A. Hidrólisis básica B. Hidrólisis ácida).

Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

Se observa en la figura 7 que se logra obtener nanocelulosa fibrilar, en donde los rangos de tamaño se encuentran entre 19-24 nm para las nanofibrillas obtenidas a partir de raquis de palma africana y entre 9,22-12 nm para las nanofibrillas obtenidas a partir del bagazo de caña. La obtención de nanofibras se debe principalmente a dos razones: (i) la hidrólisis ácida no corresponde a un tratamiento robusto, ya que se utiliza un ácido débil a una concentración relativamente baja (CH_3COOH al 6 %), lo que no permite una separación de las regiones cristalinas de las fibras y como consecuencia se mantiene la fibra completa; (ii) se utilizó un tratamiento mecánico para reducir el tamaño de las microfibras y como resultado se mantienen tanto las regiones amorfas como cristalinas del material y solo se da una separación física en elementos más pequeños.

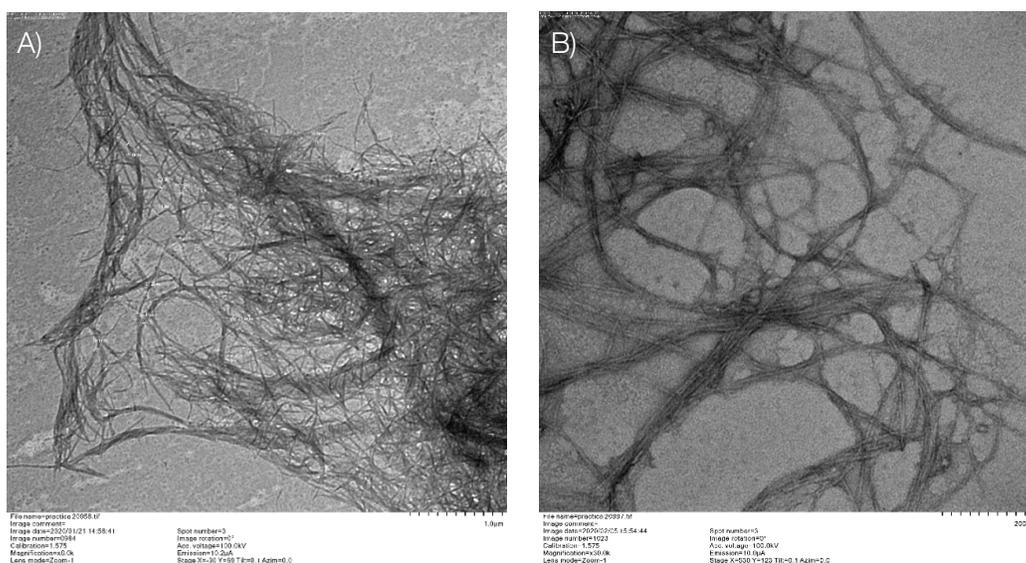


Figura 7. Microscopía electrónica de transmisión para la nanocelulosa. Muestra A: Raquis de palma africana Magnificación 6,0K., Muestra B: Bagazo de caña Magnificación 30.0K

Difracción de Rayos X (XRD)

Los difractogramas presentados en la figura 8 se utilizaron para determinar el *Índice de Cristalinidad (IC)*, presentado en el cuadro 3. Este índice es una medida de la cristalinidad relativa de los materiales cuando se tiene una combinación de regiones cristalina y amorfas. Se observa en el raquis de palma africana que al realizar la degradación básica se aumenta el *IC* en un 18% mientras que al realizar el tratamiento ácido se aumenta un 12% para aumento de la cristalinidad total en el proceso de 30%.

Mientras que, para el caso del bagazo de caña al poseer mayor cristalinidad en la materia prima el primer proceso solo otorga un aumento en 4% del *IC* y un 10% con el tratamiento ácido. Para obtener un total de 14% en el aumento de cristalinidad.

El aumento en el *IC* con el primer tratamiento se da porque el NaOH después de cierta concentración es capaz de penetrar en la red de la celulosa para degradar carbohidratos en las regiones amorfas, producir una serie de complejos cristalinos bien definidos que contienen una serie de iones sodio y agua dentro de la red. Por otra parte, el aumento en el *IC* debido al segundo tratamiento se da a consecuencia de que los tratamientos ácidos son selectivos para degradar las regiones amorfas de las microfibras [50], [51]. Las señales encontradas en

el espectro de Fibras tratadas con NaOH que no corresponden al pico cristalino ni amorfo de la celulosa se atribuyen a NaC [52] remanente de los lavados y neutralización del tratamiento básico, lo que generaría cristales de sal en la superficie.

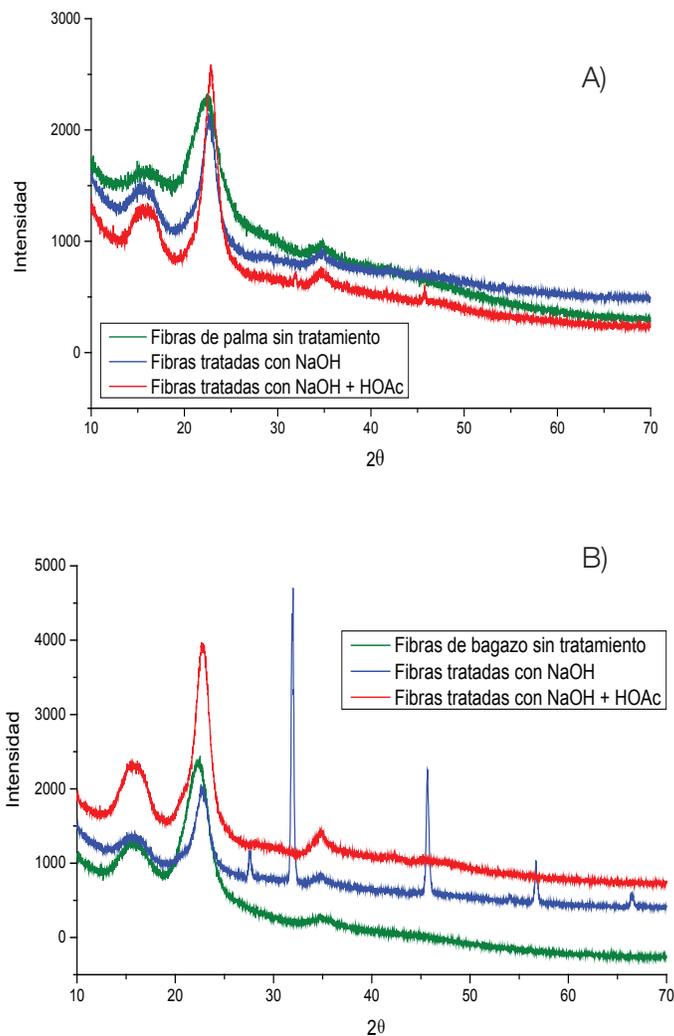


Figura 8. Difracción de rayos X. Muestra A: raquis de palma africana, muestra B: bagazo de caña.

Cuadro 3. Índice de cristalinidad para el raquis de palma africana y el bagazo de caña, acorde al tratamiento efectuado.

Materia prima	Cristalinidad (%)		
	Sin tratar	Tratamiento básico	Tratamiento ácido
Palma Africana	40	58	70
Bagazo de caña	56	60	70

Conclusiones y/o recomendaciones

La combinación de una hidrólisis básica con NaOH al 2 % (m/m) a 150 lb de presión y una hidrólisis ácida con CH₃COOH al 6 % (m/m) a 100 lb de presión fue funcional para obtener celulosa a partir de un ráquis de palma africana que contenía 31,4±1,3 % de celulosa y

22,6±1,1 % de lignina, logrando un porcentaje de remoción de lignina de 74,1 %; dejando como consecuencia microfibras de celulosa de 6-12 µm. El mismo resultado se obtuvo con bagazo de caña que contenía 24,0±2,7 % de celulosa y 30,4±1,5 % de lignina. Al cual se le removió un 65,6% de lignina inicial y se obtuvo microcelulosa con estructura más laminar que fibrilar con un tamaño de 10-18 µm bajo las mismas condiciones. Esto demuestra una ventaja en la producción del material ya que usando reactivos comunes con concentraciones bajas y presiones moderadas se transformaron materiales lignocelulósicos considerados residuos en microcelulosa, la cual posee características fisicoquímicas que podrían resultar de interés en diversas aplicaciones.

Asimismo, al aplicar la sonificación se obtuvieron nanofibrillas de celulosa tanto del raquis de palma africana como del bagazo de caña con un tamaño de 19-24 nm y 9,22-12 nm respectivamente. Lo que conlleva a una clara transformación de la microcelulosa a escala nanométrica por un método que solo involucra agua como disolvente haciendo el proceso menos contaminante.

Además, se obtuvo una cristalinidad del 70 % en las nanofibrillas elaboradas a partir de las dos materias primas; destacando un aumento de 30 % del *IC* para el raquis de palma y de solo un 14 % para el bagazo de caña al finalizar los tratamientos químicos. Lo que revela que al usar reactivos a bajas concentraciones y presiones moderadas se obtiene microcelulosa pero esto influye muy poco en el aumento de cristalinidad cuando el material tiene un *IC* relativamente elevado ya que es un tratamiento poco robusto por sus condiciones.

Agradecimientos

A la Sede Caribe de la Universidad de Costa Rica. Al Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (INII) y a su Unidad de Recursos Forestales (ReForesta).

Referencias

- [1] INEC, "Encuesta Nacional Agropecuaria 2019. Resultados Generales de la Actividad Agrícola y Forestal," San José, Costa Rica, 2020. [Online]. Available: <https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/reena-cultivos2019.pdf>.
- [2] S. Mora Ramírez, R. Quesada Salas, L. Jaén Barrantes, and D. Monge Cordero, "Boletín Estadístico Agropecuario N° 30|Serie Cronológica 2016-2019," 2020.
- [3] C. I. Torres Pérez and L. A. Quintero Lopez, "Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar," *Ing. USBMed*, vol. 10, no. 1, pp. 8–18, 2019, doi: 10.21500/20275846.3662.
- [4] R. Rodríguez, "Aproveche desechos como energía," *La República*, Dec. 28, 2013.
- [5] CANAPALMA, "Antecedentes sobre el cultivo e industrialización de la palma africana en el país," *Quienes somos*. http://www.canapalma.cr/?page_id=1195 (accessed Jan. 05, 2020).
- [6] Programa CYMA Competitividad y Medio Ambiente, *Plan de residuos sólidos-Informe de avance No1: Diagnóstico y áreas prioritarias*. San José, Costa Rica: Editorama, 2007.
- [7] C. Tenorio, R. Roque, and J. Valaert, "Characterisation of pellets made from oil palm residues in Costa Rica," *J. Palm Oil Res.*, vol. 28, pp. 198–210, Jun. 2016, doi: 10.21894/jopr.2016.2802.08.
- [8] V. González and J. Morin, "Costa Rica Sugar Annual Report: Executive Summary," 2019. [Online]. Available: <https://www.fas.usda.gov/data/costa-rica-sugar-annual-5>.
- [9] LAICA, "Ingenios," *Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar*. <https://laica.cr/ingenios/> (accessed Jan. 02, 2019).
- [10] F. D. Jiménez Rey, "ELABORACIÓN DE UN MATERIAL BIOLÓGICO A PARTIR DEL HONGO PLEUROTUS OSTREATUS PARA SU UTILIZACIÓN EN APLICACIONES DE INGENIERÍA," Universidad de Costa Rica, 2018.

- [11] R. G. Mejías Vásquez, "Evaluación del balance de energía del Sistema de Turbogeneración usado para la deficiencia de la 'Metodología Tarifaria para una Planta Modelo de Generación de Electricidad con Bagazo de Caña' vigente en Costa Rica en el año 2015," Universidad de Costa Rica, 2018.
- [12] N. Bagotia, A. Kumar Sharma, and S. Kumar, "A review on modified sugarcane bagasse biosorbent for removal of dyes," 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129309.
- [13] J. Sandoval Salazar, "Potencial de aporte en generación eléctrica en Costa Rica por parte de los ingenios azucareros mediante biomasa," Universidad de Costa Rica, 2014.
- [14] A. Mandal and D. Chakrabarty, "Isolation of nanocellulose from waste sugarcane bagasse (SCB) and its characterization," *Carbohydr. Polym.*, vol. 86, no. 3, pp. 1291–1299, 2011, doi: 10.1016/j.carbpol.2011.06.030.
- [15] D. Páliz Hidalgo, "Factibilidad del uso del raquis de palma africana en mezcla con agregados de construcción para la fabricación de ladrillos ecológicos," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2014.
- [16] B. Deepa *et al.*, "Utilization of various lignocellulosic biomass for the production of nanocellulose: a comparative study," *Cellulose*, vol. 22, no. 2, pp. 1075–1090, 2015, doi: 10.1007/s10570-015-0554-x.
- [17] F. Jiang and Y.-L. Hsieh, "Chemically and mechanically isolated nanocellulose and their self-assembled structures," *Carbohydr. Polym.*, vol. 95, no. 1, pp. 32–40, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.022>.
- [18] M. Jorfi and E. J. Foster, "Recent advances in nanocellulose for biomedical applications," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, no. 14, pp. 1–19, 2015, doi: 10.1002/app.41719.
- [19] H. V. Lee, S. B. A. Hamid, and S. K. Zain, "Conversion of lignocellulosic biomass to nanocellulose: Structure and chemical process," *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/631013.
- [20] M. Camacho *et al.*, "Synthesis and characterization of nanocrystalline cellulose derived from Pineapple peel residues," *J. Renew. Mater.*, vol. 5, no. 3–4, pp. 271–279, 2017, doi: 10.7569/JRM.2017.634117.
- [21] P. Rigg-Aguilar, R. Moya, J. Vega-Baudrit, A. Navarro-Mora, and J. Gaitan-Alvarez, "European Pallets Fabricated with Composite Wood Blocks from Tropical Species Reinforced with Nanocrystalline Cellulose: Effects on the Properties of Blocks and Static Flexure of the Pallet," *Bioresour. Vol 14, No 2*, 2019, [Online]. Available: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_14_2_3651_Rigg_Aguilar_European_Pallet_Composite_Wood_Blocks.
- [22] P. Rigg-Aguilar *et al.*, "Micro-and Nanofibrillated Cellulose (MNFC) from Pineapple (*Ananas comosus*) Stems and Their Application on Polyvinyl Acetate (PVAc) and Urea-Formaldehyde (UF) Wood Adhesives," 2020, doi: 10.1155/2020/1393160.
- [23] E. G. Jirón García, K. Rodríguez Mora, and C. Bernal, "Cellulose Nanofiber Production from Banana Rachis," *Int. J. Eng. Sci. Comput.*, vol. 10, no. 2, pp. 24683–24689, 2020.
- [24] S. Michałowski, M. A. Mosiewicki, M. Kurańska, M. I. Aranguren, and A. Prociak, "Polyurethane composites synthesized using natural oil-based polyols and sisal fibers," *J. Renew. Mater.*, vol. 6, no. 4, pp. 426–437, 2018, doi: 10.7569/JRM.2017.634163.
- [25] P. Rigg-Aguilar *et al.*, "Micro- and Nanofibrillated Cellulose (MNFC) from Pineapple (*Ananas comosus*) Stems and Their Application on Polyvinyl Acetate (PVAc) and Urea-Formaldehyde (UF) Wood Adhesives," *J. Nanomater.*, vol. 2020, p. 1393160, 2020, doi: 10.1155/2020/1393160.
- [26] E. Solís, "Efecto de la nanocelulosa obtenida del desecho del rastrojo de piña en mezclas cementicias de mortero hidráulico," Universidad de Costa Rica, 2018.
- [27] T. Abitbol *et al.*, "Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications," *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 39, no. 1, pp. 76–88, 2016, doi: 10.1016/j.copbio.2016.01.002.
- [28] P. Phanthong, P. Reubroycharoen, X. Hao, G. Xu, A. Abudula, and G. Guan, "Nanocellulose: Extraction and application," *Carbon Resour. Convers.*, vol. 1, no. 1, pp. 32–43, 2018, doi: 10.1016/j.crcon.2018.05.004.
- [29] A. W. Carpenter, C. F. De Lannoy, and M. R. Wiesner, "Cellulose nanomaterials in water treatment technologies," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 9, pp. 5277–5287, 2015, doi: 10.1021/es506351r.
- [30] Y. Liu *et al.*, "Cascade utilization of lignocellulosic biomass to high-value products," *Green Chem.*, vol. 21, no. 13, pp. 3499–3535, 2019, doi: 10.1039/c9gc00473d.
- [31] K. Rahbar Shamskar, H. Heidari, and A. Rashidi, "Study on Nanocellulose Properties Processed Using Different Methods and Their Aerogels," *J. Polym. Environ.*, vol. 27, no. 7, pp. 1418–1428, 2019, doi: 10.1007/s10924-019-01438-7.
- [32] A. Mandal and D. Chakrabarty, "Studies on the mechanical, thermal, morphological and barrier properties of nanocomposites based on poly(vinyl alcohol) and nanocellulose from sugarcane bagasse," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 20, no. 2, pp. 462–473, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.05.003>.

- [33] Y. Habibi, "Key advances in the chemical modification of nanocelluloses," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 5, pp. 1519–1542, 2014, doi: 10.1039/c3cs60204d.
- [34] F. Jiang and Y. Lo Hsieh, "Chemically and mechanically isolated nanocellulose and their self-assembled structures," *Carbohydr. Polym.*, vol. 95, no. 1, pp. 32–40, 2013, doi: 10.1016/j.carbpol.2013.02.022.
- [35] M. Mahardika, H. Abrial, A. Kasim, S. Arief, and M. Asrofi, "Production of nanocellulose from pineapple leaf fibers via high-shear homogenization and ultrasonication," *Fibers*, vol. 6, no. 2, pp. 1–13, 2018, doi: 10.3390/fib6020028.
- [36] Q. Wang and Y. H. Zhang, "Extraction of nanocellulose from sugarcane bagasse," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 633–634, pp. 550–553, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.550.
- [37] A. Cerda, L. Mejías, T. Gea, and A. Sánchez, "Cellulase and xylanase production at pilot scale by solid-state fermentation from coffee husk using specialized consortia: The consistency of the process and the microbial communities involved," *Bioresour. Technol.*, vol. 243, pp. 1059–1068, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.07.076.
- [38] V. Hospodarova, E. Singovszka, and N. Stevulova, "Characterization of cellulosic fibers by FTIR spectroscopy for their further implementation to building materials," *Am. J. Anal. Chem.*, vol. 9, no. 06, p. 303, 2018.
- [39] K. Singh, T. J. M. Sinha, and S. Srivastava, "Functionalized nanocrystalline cellulose: Smart biosorbent for decontamination of arsenic," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 139, pp. 51–63, 2015, doi: 10.1016/j.minpro.2015.04.014.
- [40] R. Zuluaga, J. L. Putaux, J. Cruz, J. Vélez, I. Mondragon, and P. Gañán, "Cellulose microfibrils from banana rachis: Effect of alkaline treatments on structural and morphological features," *Carbohydr. Polym.*, vol. 76, no. 1, pp. 51–59, 2009, doi: 10.1016/j.carbpol.2008.09.024.
- [41] H. Quoc Lam, Y. Le Bigot, M. Delmas, and G. Avignon, "A new procedure for the destructuring of vegetable matter at atmospheric pressure by a catalyst/solvent system of formic acid/acetic acid. Applied to the pulping of triticale straw," *Ind. Crops Prod.*, vol. 14, no. 2, pp. 139–144, 2001, doi: 10.1016/S0926-6690(01)00077-2.
- [42] M. M. Ibrahim, F. A. Agblevor, and W. K. El-Zawawy, "Isolation and characterization of cellulose and lignin from steam-exploded lignocellulosic biomass," *BioResources*, vol. 5, no. 1, pp. 397–418, 2010, doi: 10.15376/biores.5.1.397-418.
- [43] M. Poletto, A. J. Zattera, M. M. C. Forte, and R. M. C. Santana, "Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size," *Bioresour. Technol.*, vol. 109, pp. 148–153, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.122.
- [44] A. Alemdar and M. Sain, "Bicomposites from wheat straw nanofibers: Morphology, thermal and mechanical properties," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 557–565, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.05.044>.
- [45] R. Moya, A. Rodríguez-Zúñiga, and A. Puente-Urbina, "Thermogravimetric and devolatilisation analysis for five plantation species: Effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters," *Thermochim. Acta*, vol. 647, pp. 36–46, 2017, doi: 10.1016/j.tca.2016.11.014.
- [46] N. Številova, V. Hospodárova, and A. Eštoková, "Study of thermal analysis of selected cellulose fibres," *Geosci. Eng.*, vol. 62, no. 3, pp. 18–21, 2016.
- [47] C. H. Haigler, R. M. Brown, and M. Benziman, "Calcofluor White ST Alters the in vivo Assembly of Cellulose Microfibrils," *Science (80-.)*, vol. 210, no. 4472, pp. 903–906, Jan. 1980, [Online]. Available: <http://www.jstor.org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr:2048/stable/1684445>.
- [48] J. F. Ma, G. H. Yang, J. Z. Mao, and F. Xu, "Characterization of anatomy, ultrastructure and lignin micro-distribution in *Forsythia suspensa*," *Ind. Crops Prod.*, vol. 33, no. 2, pp. 358–363, 2011, doi: 10.1016/j.indcrop.2010.11.009.
- [49] H. M. Hernández-Hernández *et al.*, "Spectroscopic and Microscopic Study of Peroxyformic Pulping of Agave Waste," *Microsc. Microanal.*, vol. 22, no. 5, pp. 1084–1097, 2016, doi: 10.1017/S1431927616011818.
- [50] P. Ahvenainen, I. Kontro, and K. Svedström, "Comparison of sample crystallinity determination methods by X-ray diffraction for challenging cellulose I materials," *Cellulose*, vol. 23, no. 2, pp. 1073–1086, 2016, doi: 10.1007/s10570-016-0881-6.
- [51] A. Kljun, T. A. S. Benians, F. Goubet, F. Meulewaeter, J. P. Knox, and R. S. Blackburn, "Comparative analysis of crystallinity changes in cellulose i polymers using ATR-FTIR, X-ray diffraction, and carbohydrate-binding module probes," *Biomacromolecules*, vol. 12, no. 11, pp. 4121–4126, 2011, doi: 10.1021/bm201176m.
- [52] J. J. Prías-Barragán, N. A. Echeverry-Montoya, and H. Ariza-Calderón, "Fabricación y caracterización de carbón activado y de nanoplaquetas de carbón a partir de *Guadua angustifolia* Kunth para aplicaciones en electrónica," *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 39, no. 153, p. 444, 2015, doi: 10.18257/raccefyn.139.