



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Octubre - Diciembre 2024
Volumen 37-4
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

Ariana Sanabria García

Imagen de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 37-4. Octubre-
Diciembre, 2024 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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

Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr

Web: <https://www.tec.ac.cr/editorial>

http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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

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

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

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

Publicación y directorio en catálogos





TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Caracterización climática de la lluvia del Pacífico Norte de Costa Rica usando análogos construidos Climatic characterization of rainfall in the North Pacific of Costa Rica using constructed analogues <i>Kendall Ugalde, Eric J. Alfaro, Hugo G. Hidalgo, Tito Maldonado</i>	3
Versión mejorada del mapa digital de coberturas naturales de la primera edición hojas cartográficas de Costa Rica escala 1:25 000 Improved version of the digital map of natural cover of the first edition cartographic sheets of Costa Rica scale 1:25,000 <i>Julio Calvo-Alvarado, Dorian Carvajal-Vanegas, Vladimir Jiménez-Salazar, Marco Castro-Campos</i>	21
Propuesta de mejoras para la implementación del monitoreo de residuos sólidos mediante el PRONAMEC en las Áreas Marinas Protegidas de Costa Rica Proposal for Improvements for the Implementation of solid waste monitoring through PRONAMEC in the Marine Protected Areas of Costa Rica <i>Sofía Fallas-Flores, Lilliana Abarca-Guerrero, Karol Ulate-Naranjo</i>	31
Efectos del cromo en el consumo de oxígeno y excreción de amonio en tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) de agua dulce Effects of chromium on oxygen consumption and ammonium excretion in freshwater tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) <i>Bessie Evelyn Oliva-Hernández, Edison Barbieri, Juan Francisco Pérez-Sabino, Roel Campos-Rodríguez</i>	48
Factores críticos para la adopción de tecnologías en café: evidencia de la Región Brunca de Costa Rica Critical factors for technology adoption in coffee: evidence from the Brunca Region of Costa Rica <i>David Gómez-Castillo, Anthony Cubero-Zamora, Luz E. Barrantes-Aguilar, Vanessa Villalobos-Ramos</i>	61
Compuestos orgánicos volátiles biogénicos: estado del arte sobre metodologías de muestreo y cuantificación de sus emisiones gaseosas Volatile biogenic organic compounds: state of the art on sampling methodologies and quantification of their gas emissions <i>Jose Carlos Mora-Barrantes</i>	74

Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para vehículos en Costa Rica, 2014

Comparison of two methodologies for calculating greenhouse gas emissions for vehicles in Costa Rica, 2014
Priscila Picado-Valenzuela, Javier E. Rodríguez-Yáñez, José Pablo Sibaja-Brenes 89

Inteligencia artificial aplicada a la operación y mantenimiento de aerogeneradores

Artificial intelligence applied on the operation and maintenance of wind turbines
Brandon Obregón, Otto Arias-Blanco, Ronny Zúñiga-Granados, Gustavo Richmond-Navarro..... 100

Capitales naturales y su conservación en comunidades rurales de Guatemala

Natural Capitals and their Conservation in Rural Communities of Guatemala
Carlos Augusto Vargas-Gálvez, Michelle Bustamante-Castillo, Manuel A. Barrios-Izás 110

Papel del Mioinositol en la regulación hormonal femenina y el Síndrome de Ovario Poliquístico

The Role of Myo-Inositol in the regulation of female hormones and Polycystic Ovary Syndrome
Hazel Johanna Martínez-Loría, Lester Fabian Vargas-Zúñiga, Joshua Andrey González-Vargas, Kristel Mariana Cordero-Robles, María José Urrea-Mayorga..... 133

Contenido de metales pesados en sedimentos de varios ríos de Costa Rica

Heavy metals content in sediments of several rivers in Costa Rica
Guillermo Calvo-Brenes, Noemi Quirós-Bustos, Diana Robles-Chaves, Andrey Caballero-Chavarría..... 141

Alergia al Ácido Acetilsalicílico (AAS) en el contexto de AINEs: navegando desde una perspectiva inmunitaria

Acetylsalicylic Acid (ASA) allergy in the context of NSAIDs: navigating from an immune perspective
Reychell Barrantes-Alvarado, Julyana Coronado-Salazar, Donalld Díaz-Méndez, Andrés Monge-Brenes, Alison Salas-Campos 152

Celulosa bacteriana: el biopolímero de la naturaleza

Bacterial Cellulose: Nature's Biopolymer
Milena Alvarado-Rojas, Josué Castro-Brenes, Fabián Orias-Obando..... 162

Application of commercial sand aggregates in hydrophobized hydraulic concrete materials

Utilización de arenas comerciales en materiales de concreto hidrofobizados
Ernesto Mora, Erick Castellón..... 171

Caracterización climática de la lluvia del Pacífico Norte de Costa Rica usando análogos construidos

Climatic characterization of rainfall in the North Pacific of Costa Rica using constructed analogues

Kendall Ugalde¹, Eric J. Alfaro², Hugo G. Hidalgo³, Tito Maldonado⁴

Fecha de recepción: 16 de agosto, 2023
Fecha de aprobación: 6 de diciembre, 2023

Ugalde, K; Alfaro, E. J; Hidalgo, H. G; Maldonado, T. Caracterización climática de la lluvia del Pacífico Norte de Costa Rica usando análogos construidos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 3-20.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6842>

1 Universidad Estatal a Distancia, Escuela de Ciencias Exactas y Naturales. Costa Rica.

 kugaldec@uned.ac.cr


 <https://orcid.org/0000-0002-9762-9811>

2 Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Escuela de Física, San Pedro, San José, Costa Rica.

 erick.alfaro@ucr.ac.cr


 <https://orcid.org/0000-0001-9278-5017>

3 Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Centro de Investigación en Matemática Pura y Aplicada (CIMPA), Escuela de Física, San Pedro, San José, Costa Rica.

 hugo.hidalgo@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-4638-0742>

4 Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), San Pedro, San José, Costa Rica.

 tito.maldonado@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-9774-9082>



Resumen

Se determina el inicio y término de la estación lluviosa (IELL y TELL respectivamente), además de la duración de la estación seca y lluviosa (DES y DELL respectivamente), con datos de precipitación en rejilla sobre Guanacaste para el periodo 1950-2020 conformado por el acople de dos conjuntos de datos, el primero es el conjunto Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) y el segundo siendo el reanálisis ERA5 al que se le aplicó un ajuste de escala para extender la cobertura temporal de los datos de CHIRPS. Se caracterizó su IELL, TELL, DELL y DES con estadísticos como la mediana, desviación estándar, rango inter cuartil y tendencias. Además, se relacionaron con fuentes de variabilidad climática como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la temperatura superficial del océano Atlántico Tropical Norte (ATN) y la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés). Los datos representan adecuadamente la climatología del IELL, TELL, DELL, DES y las precipitaciones de la región, además de capturar la variabilidad asociada a la CLLJ y al acople de los océanos (ATN-ENOS), pero no la asociada al ATN y ENOS individualmente. Aunque no se pudo determinar si esto se debe a los datos de ERA5 o al método de reducción de escala usado, por lo que se recomienda verificar si ERA5 captura tal variabilidad oceánica al realizar el mismo análisis en un periodo de tiempo de 1980-2020 donde se tiene mayor disponibilidad de observaciones como estaciones meteorológicas o CHIRPS que ya ha sido validada.

Palabras clave

Duración de la Estación Seca y Lluviosa; Guanacaste; Inicio y Término de la Estación Lluviosa; Reducción de escala; Variabilidad Climática.

Abstract

The onset and demise of the rainy season (IELL and TELL, respectively in Spanish), also the duration of the dry and rainy seasons (DES and DELL, respectively in Spanish) are determined, with gridded precipitation data on Guanacaste for the period 1950-2020 constructed by coupling two data sets: 1) the dataset Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS), and 2) the ERA5 reanalysis to which a downscaling method was applied to extend the data beyond the period covered by CHIRPS. Their IELL, TELL, DELL, and DES were characterized with statistics such as the median, standard deviation, interquartile range, and trends. In addition, were related to sources of climate variability such as El Niño Southern-Oscillation (ENSO), the sea surface temperature of the tropical north Atlantic (TNA) and the Caribbean Low-Level Jet (CLLJ). The dataset adequately represents the IELL, TELL, DELL, DES and the precipitations of the region, in addition to capturing the variability associated with the CLLJ and the coupling of the oceans (TNA-ENSO), but not that associated with the TNA and ENSO individually. Although it could not be determined if this is due to the ERA5 dataset or the downscaling method used, so it is recommended to verify if ERA5 captures such oceanic variability when performing the same analysis in a period of time from 1980-2020 where there is greater availability of observations such as meteorological gauge stations or CHIRPS that has already been validated.

Keywords

Climate Variability, Downscaling, Guanacaste, Onset and demise of the rainy season, Rainy and dry season duration.

Introducción

El establecimiento de las lluvias en América Central es un fenómeno que se ha estudiado por diversos autores [1]–[3], encontrando que el inicio de la estación lluviosa (IELL) tiende a ocurrir temprano (tarde) en los países al sur (norte) de la región, mientras el término de la estación lluviosa (TELL) exhibe un comportamiento contrario, asociando el fenómeno a la traslación latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Además, se ha determinado que fuentes de variabilidad climática como las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico Tropical del Este y el Atlántico o la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés; [4], [5]) influyen en las lluvias de la región [1], [6], [7].

Son diversos los métodos usados para determinar las fechas del IELL y TELL, uno de los más comunes consiste en reducir las series temporales de precipitación en pentadas (promedios de 5 días) y buscar las que superen cierto umbral de precipitación de unos 25 mm para establecer el IELL, mientras que para el TELL se hace lo mismo recorriendo la serie en sentido contrario [3]. Sin embargo, en [8] se aplica un método más complejo basado en el estudio de [9] donde se buscan puntos de inflexión en las series de precipitaciones.

En [10] se usó el método de [8] para determinar el IELL y TELL, además de la duración de la estación seca y lluviosa (DES y DELL respectivamente) sobre Guanacaste usando datos de alta resolución espacial y temporal del conjunto denominado “Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS)” de 1981 a 2020 [11]. Se encontró que los IELL ocurren antes en cantones centrales de Guanacaste cerca de la desembocadura del Tempisque, y más tarde hacia regiones costeras, al este y al norte de la provincia. Se determinó que los TELL son muy uniformes en la provincia, siendo más tardes al sur y más tempranos en la zona central y norte. Mientras que la DES y DELL, son simétricas entre sí y muy uniformes en la provincia mostrando las condiciones más secas al norte y las más húmedas al sur y este de la región. Además, las tendencias indican comportamientos hacia IELL más tempranos, TELL más tardíos, DES más cortas y DELL más largas.

Por otro lado, [10] también estudió la relación entre las fechas de la estación seca y lluviosa con diferentes fuentes de variabilidad climática como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Multidecenal del Atlántico (OMA; [12], [13]) y la CLLJ. Principalmente determinó que un calentamiento relativo del Atlántico con respecto al Pacífico ecuatorial favorece que las lluvias inicien antes y acaben tarde, es decir la estación lluviosa se prolonga y la seca se acorta, para un enfriamiento relativo de los océanos se esperan condiciones contrarias. En el caso de una CLLJ intensa se favorecen condiciones secas, es decir las lluvias inician tarde y acaban antes, prolongando la estación seca y acortando la lluviosa, si la CLLJ es débil se esperan condiciones contrarias.

El conjunto de datos de CHIRPS permitió a [10] representar la estación seca y lluviosa sobre Guanacaste en un periodo de 40 años, sin embargo, contar con series de tiempo más extensas permitiría contemplar la variabilidad a mayor plazo. Existen conjuntos de datos temporalmente más extensos que CHIRPS, aunque cuentan con una resolución espacial mucho menor, lo que evitaría la captura de posibles fenómenos más locales en Guanacaste.

La resolución espacial se puede aumentar, como indican en [14] existen en general dos métodos de reducción de escala. El primero de ellos es el método de ajuste dinámico el cual usa un modelo regional de alta resolución con condiciones de frontera como función del tiempo derivadas del modelo de menor resolución, se puede considerar como un modelo regional inmerso en uno global, por lo que es muy importante identificar un modelo global que aporte la información más relevante al modelo regional (e.g. [15]). Mientras el segundo es el método de ajuste estadístico, el cual utiliza el mismo modelo de baja resolución y construye la información de alta resolución a partir de parámetros estadísticos o series de tiempo históricas, basados

en relaciones empíricas entre predictores globales y predictantes regionales (e.g.[16]). Uno de estos métodos es el propuesto por [17] conocido como “Constructed Analogues (CA)” que consiste en construir un análogo de un patrón meteorológico diario de baja resolución espacial combinando patrones meteorológicos de varios días (predictores) de una biblioteca con patrones de alta resolución.

Esta investigación busca determinar las fechas del IELL, TELL, DES y DELL, utilizando la metodología de [9] modificada por [8] sobre datos de precipitación en rejilla que cubren toda la zona de Guanacaste, provenientes del acople de dos bases de datos, la primera el reanálisis ERA5 (1950-1980) [18] al que se le aplicó el método de reducción de escala CA y CHIRPS (1981-2020) [11] para conformar una base de datos a largo plazo llamada ERA5+CHIRPS (1950-2020). También se busca determinar la relación de estas fechas con fuentes de variabilidad climática que modulan las precipitaciones en América Central.

Materiales y métodos

Se utilizaron los datos de precipitación del reanálisis ERA5 [18] producidos por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF por sus siglas en inglés). El reanálisis ERA5 se basa en el Sistema Integrado de Pronóstico operativo desde el 2016, que aprovecha los desarrollos posteriores al reanálisis ERA-Interim. ERA5 aumenta la resolución espacial a 31 km y su resolución temporal es de una hora, con datos disponibles desde 1950 hasta la actualidad. Comparaciones del ERA5 con otras bases de datos muestran una mejora para diversas variables, como lo es el aumento en la correlación de la media mensual de los datos de precipitación del Proyecto de Climatología de Precipitación Global (GPCP) [18].

El estudio se limitó sobre la región de Guanacaste, por lo que la resolución espacial de aproximadamente 31 km de ERA5 es baja. Sobre los datos de precipitación de ERA5 se aplicó el método de reducción de escala de CA según la metodología de [17], para obtener una base de datos con una mayor resolución espacial, de unos 5 km y que además de esta ventaja, permite extender el período de los datos a la cobertura temporal disponible de ERA5. La aplicación de la técnica de CA sobre los datos de ERA5 se hizo para generar una base de datos a largo plazo de 1950 a 2020, esta consistió en un acople de los datos de ERA5 con reducción de escala y los datos de CHIRPS usados por [10].

El conjunto de datos de precipitación (ERA5+CHIRPS) fue sometido a la metodología para determinar el IELL, TELL, DELL y DES de acuerdo con [8], que modifica el método expuesto por [9]. Esta fue usada recientemente por [10] en la región del Pacífico Norte de Costa Rica donde se explica detalladamente, en resumen el método aplica la ecuación 1 a las series de precipitación para calcular la desviación del acumulado de precipitación, luego la serie se suaviza usando una media móvil de 31 días y se buscan los puntos de inflexión que se relacionan con el IELL y TELL.

$$S(n) = \sum_{i=t_0}^n (P(i) - P_C)$$

Ecuación 1

Donde $S(n)$ es la desviación del acumulado de precipitación con respecto a la media anual en el día n , $P(i)$ es la precipitación diaria en el día i , P_C es el promedio diario anual de precipitación y t_0 es el día de inicio para los cálculos.

Se calcularon algunos parámetros estadísticos para caracterizar el comportamiento climatológico de los fenómenos en la región para el periodo de estudio. Estos fueron la media aritmética y mediana como medidas de localización y la desviación estándar y rango inter cuartil como medidas de dispersión. Además, se calcularon las tendencias mediante el método de mínimos cuadrados como una regresión lineal simple.

Diversas fuentes de variabilidad climática pueden influenciar en la época lluviosa y seca en América Central, en este caso se estudia el ENOS, la temperatura superficial del mar (TSM) del Atlántico Tropical Norte (ATN), la CLLJ y el dipolo entre las TSM del Pacífico y el Atlántico que ya han demostrado en influir en las lluvias de América Central (eg. [7], [20], [21]), aunque se debe tener en consideración que otros fenómenos con periodo intraestacional también afectan la climatología de las precipitaciones en la región como la oscilación Madden-Julian (OMJ) [22].

Para el ENOS, se usó la región del Niño 3.4 (N3.4) descrita por [23], abarcada entre las latitudes 5° N – 5° S y longitudes 170° O – 120° O, el índice asociado a estas anomalías de las TSM del N3.4 se encuentra disponible en el sitio web <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/ersst5.nino.mth.81-10.ascii>. Para el ATN se tomó el índice del sitio web <https://psl.noaa.gov/data/correlation/tna.data>, el índice abarca solo el Atlántico Tropical Norte (5.5° N – 23.5° N), para representar una región más tropical y cercana a América Central. Mientras que para calcular el índice asociado al dipolo entre las TSM del Atlántico y el Pacífico se normalizaron las series del ATN y N3.4 para luego realizar la resta ATN-N3.4.

Para el último índice asociado a la CLLJ se hizo lo mismo que en [7], promediando los datos de viento zonal a 925 hPa en la región 7.5° N – 12.5° N y 85° O – 75° O, esto según las características para la CLLJ descritas por [5], [19], [24].

Estos índices mensuales se promediaron en las mismas fechas usadas por [10], es decir como el IELL ocurre rondando mayo y el TELL rondando noviembre [1], se promediaron los índices de abril y mayo para relacionarlo al IELL, de octubre y noviembre para relacionarlo al TELL, de mayo a octubre para relacionarlo a la DELL y de noviembre (del año anterior) a abril (del año posterior) para relacionarlo a la DES, por la forma en la que se define esta última siempre contará con un año menos que el resto de índices. Como ejemplo, la figura 1 muestra el comportamiento del índice ATN-N3.4 en el periodo de 1950-2020.

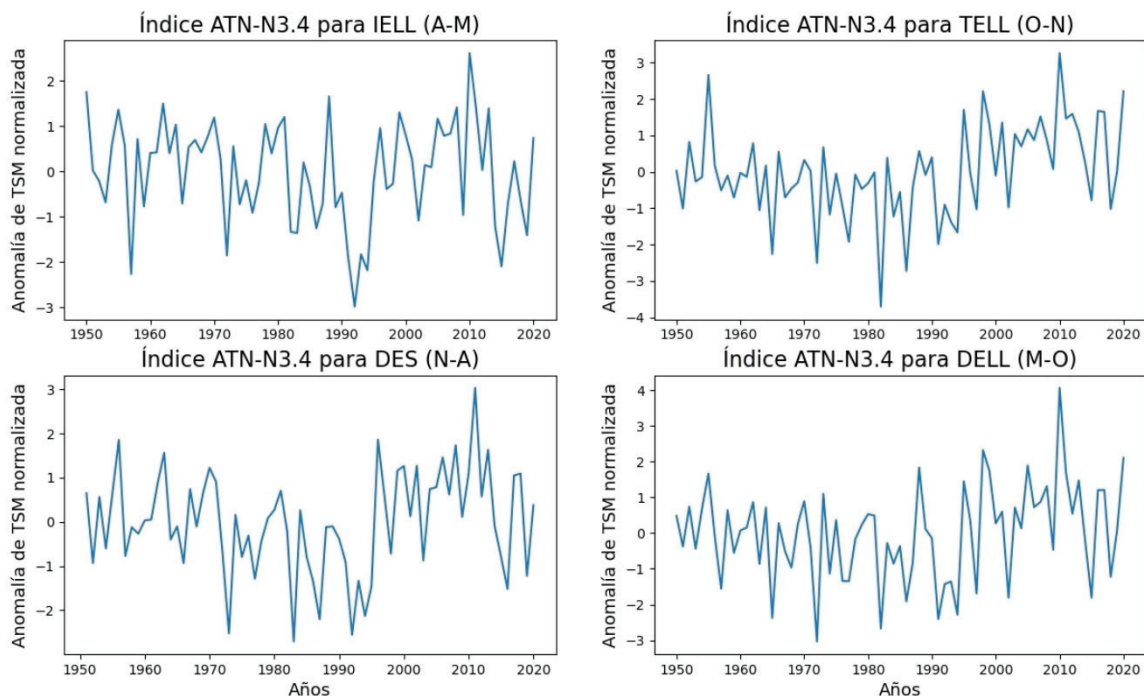


Figura 1. Índice ATN para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.

Para simplificar el proceso se usó el análisis de componentes principales (ACP) para reducir todo el conjunto de las series del IELL, TELL, DELL y DES obtenidos de ERA5+CHIRPS a unas pocas variables según indica [25]. Este consiste en generar un nuevo conjunto a partir de los autovalores y autovectores de la matriz de correlación de los datos originales. El método se adaptó a Python a partir de la rutina “EOFMOD.m” programada en Matlab por D.B. Enfield y con correcciones de F. J. Soley, la matriz de correlación se calculó con la paquetería Pandas de Python [26] y los autovalores y autovectores haciendo uso de las funciones de álgebra lineal ofrecidas por la paquetería NumPy de Python [27]. Finalmente, con el *scree-plot* y la correlación de Pearson entre las primeras componentes principales (CP) con los datos originales se logró simplificar todo el conjunto ERA5+CHIRPS a una sola serie de tiempo.

Para comparar las CP asociadas al IELL, TELL, DELL y DES con los índices de variabilidad climática se calcularon entre ellos sus correlaciones de Pearson y se llevó a cabo una prueba t-student de dos colas para evaluar su significancia estadística. Además también se aplicó el análisis de tablas de contingencia detallado por [28], donde se usa la función de correlación cruzada entre una variable dependiente e independiente, siguiendo las recomendaciones de [28] usando solo tres categorías divididas por terciles indicando condiciones bajo lo normal (BN), normales (N) y arriba de lo normal (AN). Finalmente, se evaluó la significancia estadística de este método con una prueba χ^2 y una prueba de Montecarlo.

Resultados

La figura 2 representa la mediana para las series del IELL, TELL, DES y DELL con resultados muy similares a los obtenidos usando solo CHIRPS (figura 3.1 de [10]). Se aprecia que la época lluviosa empieza más temprano en las zonas centrales, cerca del 5 de mayo y más tarde en las fronteras de la provincia de Guanacaste, cerca del 13 de mayo alcanzando valores más tardes al norte (La Cruz) de hasta el 18 de mayo. Por otro lado, las lluvias terminan más temprano

en las zonas centrales, cerca del 3 de noviembre y más tarde al sur y este de la provincia, rondando el 14 de noviembre, a pesar de esto la distribución es bastante uniforme en casi todo Guanacaste.

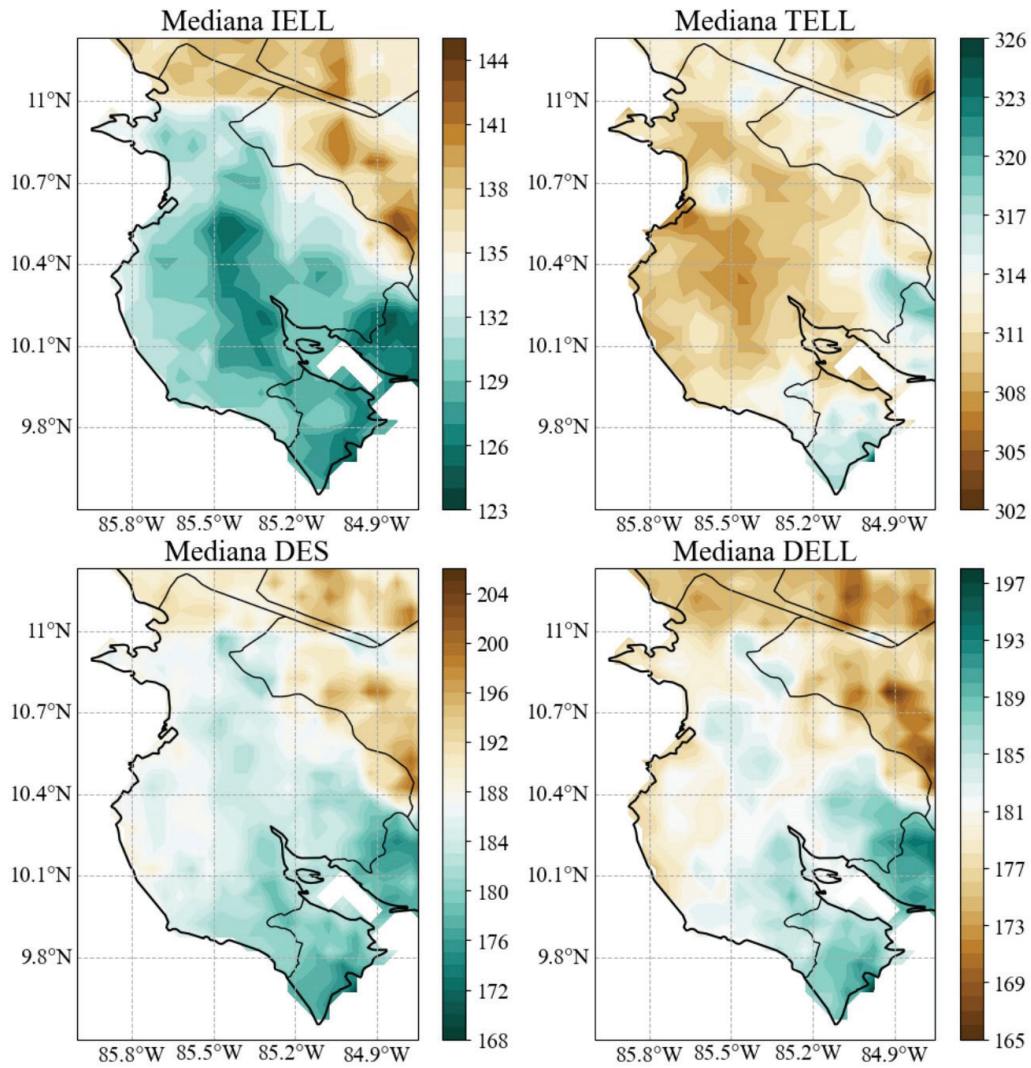


Figura 2. Mediana del día juliano del IELL y TELL, y mediana de la cantidad de días de la DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020.

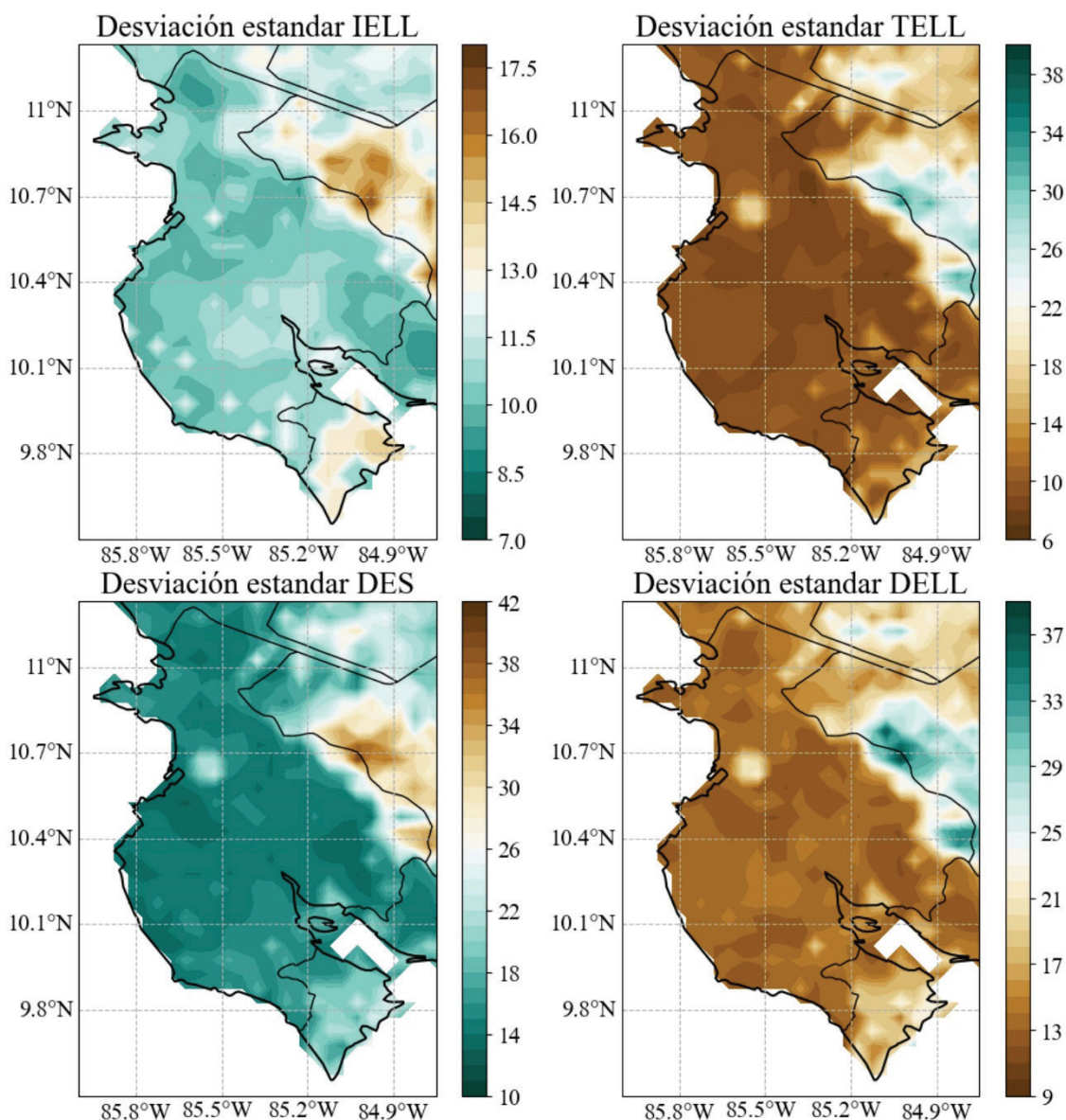


Figura 3. Desviación estándar para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020.

Por otro lado, la época seca y lluviosa muestran comportamientos uniformes en todo Guanacaste con las condiciones más secas al norte (unos 190 días para la DES y 174 para la DELL) y más húmedas al sur y oeste (unos 177 días para la DES y 190 para la DELL), lo que indica un comportamiento muy simétrico entre la DES y DELL.

La desviación estándar y rango inter cuartil (figura 3 y figura 4) rondan las dos semanas en prácticamente toda la región, con las dispersiones más altas fuera de la región de estudio, aunque abarcando una pequeña zona del cantón de Tilarán.

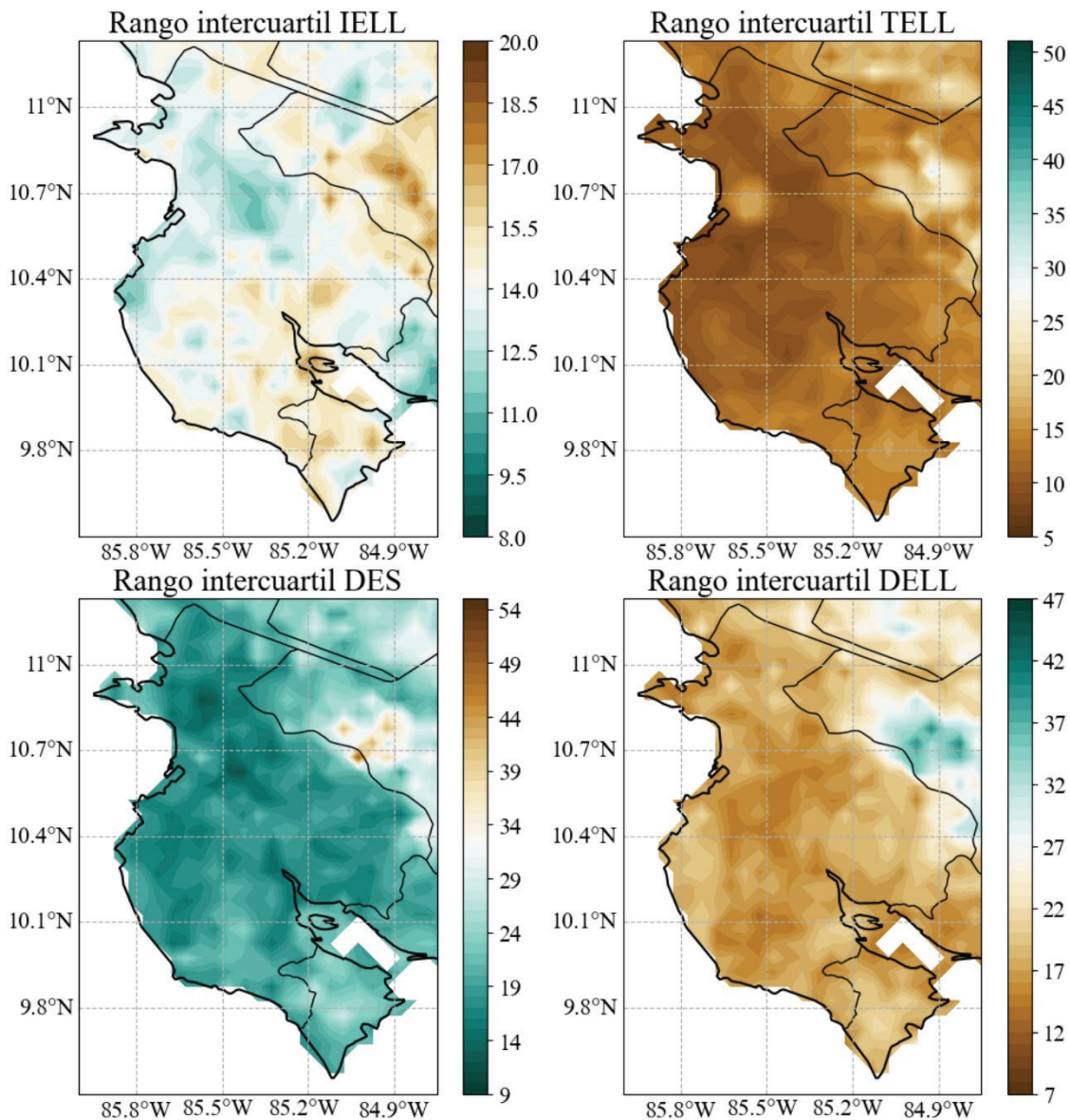


Figura 4. Rango Inter cuartil para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020.

Con respecto a las tendencias (figura 5) estas indican que tanto se atrasan o adelantan el IELL, TELL, DES y DELL, por ejemplo, una tendencia de -0.50 en el TELL implica un adelanto de medio día por cada año transcurrido para que ocurra el TELL. En general las tendencias muestran condiciones húmedas en prácticamente toda la región, implicando inicios tempranos de la estación lluviosa y términos tardíos, disminuyendo la duración de la estación seca, aunque se aprecia una zona al norte hacia condiciones secas en todas las fechas.

El cuadro 1 presenta un resumen numérico para las figuras 2, 3, 4 y 5 usando los percentiles 25, 50 y 75 (P25, P50 y P75, respectivamente), permitiendo una visualización clara de los valores medios de cada figura y los umbrales entre los cuales se encuentra el 50% de los datos en cada fecha (IELL, TELL, DES, DELL) de la región.

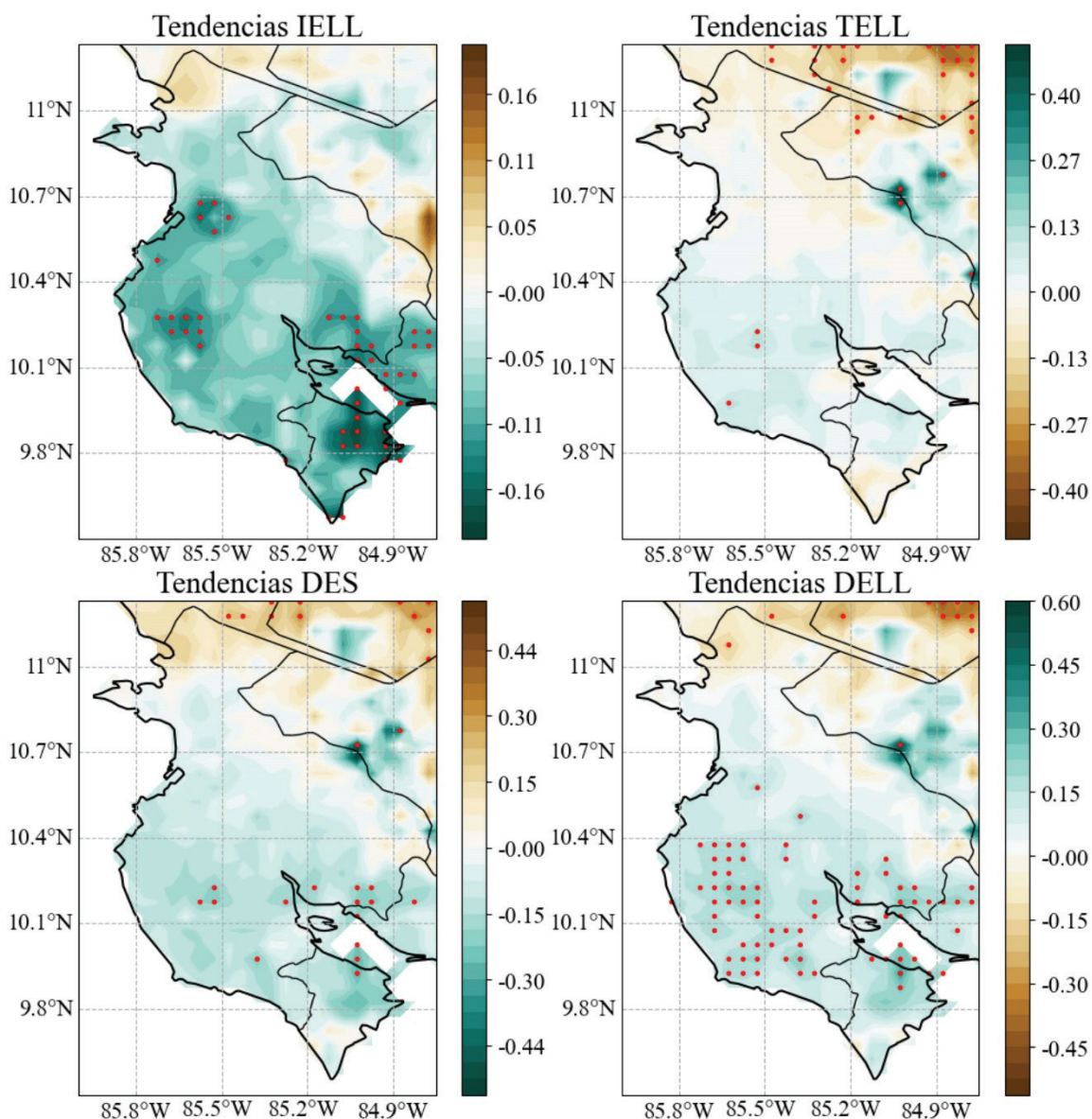


Figura 5. Tendencias para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020 con unidades de día año¹. Los puntos rojos representan zonas con significancia estadística del 95% ($\alpha < 0.05$).

Cuadro 1. Valores de los percentiles 25, 50 y 75 para el IELL, TELL, DES y DELL para los estadísticos: mediana, desviación estándar, rango inter cuartil y tendencias de ERA5+CHIRPS.

Parámetros	IELL			TELL			DES			DELL		
	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{25}	P_{50}	P_{75}
Mediana	129	132	136	310	311	313	183	186	189	176	180	184
Desviación estándar	10,1	10,7	11,8	9,1	9,8	15,4	14,5	15,6	20,4	13,2	14,3	19,0
Rango inter cuartil	13,3	14,0	15,0	11,0	13,0	15,0	17,5	19,8	22,5	16,5	18,0	21,0
Tendencias	-0,09	-0,06	-0,01	-0,05	0,00	0,05	-0,12	-0,06	0,04	-0,02	0,08	0,13

Al determinar las CP sobre los datos de ERA5+CHIRPS, se encontró que la CP1 representa la gran mayoría de la varianza en la región y muestra una alta correlación en la provincia de Guanacaste, mientras la CP2 explica una varianza bastante inferior a la CP1 (cuadro 2).

Cuadro 2. Porcentaje de la variabilidad explicada por la CP1 y CP2 asociada al IELL, TELL, DELL y DES.

% de variabilidad explicada	IELL	TELL	DES	DELL
CP 1	72.13	45.00	59.85	53.59
CP 2	7.81	11.01	7.84	7.16

Cuadro 3. Correlación de Pearson entre la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL y los índices ATN, N3.4, ATN-N3.4 y CLLJ en su respectivo periodo.

Índices	Correlación de Pearson CP1	Índices	Correlación de Pearson CP1
ATN vs IELL	-0,17	ATN-N3.4 vs IELL	<i>-0,25</i>
ATN vs TELL	0,04	ATN-N3.4 vs TELL	0,23
ATN vs DES	-0,12	ATN-N3.4 vs DES	-0,31
ATN vs DELL	0,19	ATN-N3.4 vs DELL	0,37
N3.4 vs IELL	0,11	CLLJ vs IELL	0,36
N3.4 vs TELL	<i>-0,25</i>	CLLJ vs TELL	-0,41
N3.4 vs DES	0,23	CLLJ vs DES	<i>0,28</i>
N3.4 vs DELL	<i>-0,30</i>	CLLJ vs DELL	-0,41

*Los valores en negrita representan significancia estadística al 99% y en itálica al 95% ($\alpha < 0.01$ y 0.05 , respectivamente).

El cuadro 3 muestra las correlaciones de Pearson entre los diferentes índices de variabilidad climática (N3.4, ATN, N3.4-ATN y CLLJ) y la CP1 asociada al IELL, TELL, DELL y DES. Como se puede apreciar no existe correlación significativa en ningún caso para el ATN. El índice N3.4 muestra correlaciones negativas significativas contra el TELL y DELL. El índice ATN-N3.4 muestra correlaciones significativas (a excepción del TELL) que coinciden a los ya obtenidos con CHIRPS por [10] indicando que un calentamiento relativo del Atlántico con respecto al Pacífico ecuatorial favorece que las lluvias inicien antes, que la estación seca sea más corta y la lluviosa más larga, por tanto, un enfriamiento de los océanos favorece condiciones contrarias. En el caso de la CLLJ su comportamiento es inverso al del ATN-N3.4.

Cuadro 4. Tablas de contingencia de las probabilidades empíricas condicionales (%) para la CP1 de la DELL de ERA+CHIRPS según los índices ATN-N3.4 (arriba) y CLLJ (abajo), promediados de mayo a octubre, M-0. Los valores entre paréntesis son las frecuencias empíricas absolutas y las categorías usadas son bajo lo normal (BN), neutral (N) y arriba de lo normal (AN), separadas por los percentiles 33 y 67, mostrados en los paréntesis en negrita.

		DELL		
		BN (<-5.94)	N	AN (>5.53)
ATN-N34 (M-O) $\chi^2=14.77$ (0.98)	BN (<-0.42)	63(15)***	21(5)**	17(4)***
	N	22(5)**	43(10)*	35(8)
	AN (>0.58)	17(4)***	33(8)	50(12)***
CLLJ (M-O) $\chi^2=11.45$ (0.98)	BN (<1.84 ms ⁻¹)	13(3)***	33(8)	54(13)***
	N	35(8)	39(9)	26(6)*
	AN (>2.48 ms ⁻¹)	54(12)***	25(6)	21(5)**

* Significancia estadística al 90% ($\alpha < 0.10$).

** Significancia estadística al 95% ($\alpha < 0.05$).

*** Significancia estadística al 99% ($\alpha < 0.01$).

El cuadro 4 muestra los resultados del análisis de contingencia destacando solo las correlaciones entre la DELL y los índices ATN-N3.4 y la CLLJ dada la significancia estadística. Con respecto a la tabla de contingencia entre la DELL y ATN-N3.4 las categorías más probables son (BN, BN), (N, N) y (AN, AN) sugiriendo que un ATN-N3.4 bajo lo normal es más probable que propicie una DELL más corta, un ATN-N3.4 normal implica una DELL dentro lo normal y una ATN-N3.4 arriba de lo normal es probable que propicie una DELL larga. Por otro lado, la tabla de contingencia entre la DELL y la CLLJ muestra un comportamiento contrario donde las categorías más probables son (BN, AN), (N, N) y (AN, BN), esto implica que una CLLJ bajo lo normal (arriba de lo normal) propicia una DELL más larga, condiciones normales de la CLLJ sugieren DELL normales y una CLLJ arriba de lo normal es probable que propicie DELL cortas.

Conclusiones

La alta resolución de los datos de CHIRPS y ERA5 con reducción de escala usados en la provincia de Guanacaste, permitieron caracterizar la época seca y lluviosa determinando las fechas del IELL, el TELL, la DES y la DELL para el periodo 1950-2020 (71 años), lo cual hace más robustos los resultados climatológicos.

En forma similar a los resultados obtenidos por [10] usando los datos de CHIRPS para un periodo más corto, con los datos usados de CHIRPS+ERA5 sobre Guanacaste, se encontró que las fechas del IELL ocurren más temprano en cantones centrales de Guanacaste alrededor de la desembocadura del Tempisque, donde las fechas son cada vez más tardías al desplazarse hacia regiones costeras y limítrofes con Alajuela, alcanzado los IELL más tardíos al norte de la provincia en el cantón de La Cruz, sugiriendo una dependencia latitudinal para el IELL como se ha visto en otros trabajos [1], [3], pero al tratarse de una región tan pequeña no es posible asegurar que tal comportamiento se mantenga.

Por otro lado, las fechas del TELL presentan valores más tardíos al sur y oeste de la región, mientras los valores más tempranos en la zona central y norte de Guanacaste. Además, se debe resaltar la alta uniformidad del TELL, ya que como se aprecia del cuadro 1 la diferencia entre su P_{25} y P_{75} es de tan solo 3 días por lo que la gran mayoría de los datos tienen baja

dispersión en Guanacaste, lo que podría sugerir que no hay dependencia latitudinal para el TELL, pero al igual que el IELL al tratarse de una región tan pequeña es difícil asegurar que el comportamiento se mantenga geográficamente.

Con respecto a la DES y DELL, su comportamiento es bastante uniforme en gran parte de la región con las condiciones más secas al norte y las más húmedas al sur de la península de Nicoya y al área limítrofe entre Guanacaste y Puntarenas, además el periodo entre ambas duraciones es bastante simétrico, donde aproximadamente una mitad del año exhibe una estación seca y la otra estación lluviosa, aunque esto varía un poco en las regiones más secas y húmedas de la provincia.

Los cuatro índices muestran tendencias consistentes espacialmente, aunque en general no estadísticamente significativas, hacia condiciones húmedas en los tres conjuntos de datos, lo que indica que se esperan IELL más tempranos, TELL más tardíos, DES más cortas y DELL más largas, lo que coincide con [10] al usar solo el conjunto de CHIRPS para el periodo 1981-2020. Sin embargo, solo destaca significativamente al 95% ($\alpha < 0.05$) una pequeña zona en el cantón de Abangares en el IELL y DELL (con unos pocos puntos en rejilla de la DES), otra sobre una pequeña parte de Liberia y Santa Cruz en el caso del IELL, para el DELL esta zona es más amplia y abarca casi todos los cantones al sur de Guanacaste, aunque no sobre Liberia, y finalmente una zona en la provincia de Puntarenas ubicada sobre la península de Nicoya en el caso del IELL y DELL, difiriendo con los resultados de [10] en la distribución de las zonas significativas.

El análisis de CP resultó en algunas correlaciones significativas entre los índices de variabilidad climática y la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL en los datos de ERA5+CHIRPS para los 71 años considerados, donde se destaca principalmente las correlaciones debidas al ATN-N3.4 y la CLLJ. Estas implican que un índice del ATN-N3.4 positivo (negativo) favorece las condiciones húmedas (secas), mientras la CLLJ muestra un comportamiento inverso, esto posiblemente esté ligado al movimiento latitudinal de la ZCIT y los eventos convectivos en la región influenciados por las condiciones del océano Atlántico, océano Pacífico y la intensidad de la CLLJ como se ha visto en diversos trabajos [1], [7], [20], [29]. Además estas correlaciones son similares a las obtenidas por [10] usando los datos CHIRPS y el índice OMA en lugar del ATN para los años 1981-2020.

Por su parte la correlación entre la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL del conjunto de datos ERA5+CHIRPS y los índices de variabilidad climática, muestra resultados similares a los que se obtienen usando únicamente CHIRPS [10], aunque con menor significancia en los índices oceánicos (ATN-N3.4 principalmente). Según [10], esto posiblemente se deba a que por separado los datos de ERA5 presenten menor o poca correlación contra los índices oceánicos. De modo que las correlaciones significativas del conjunto de datos ERA5+CHIRPS se debe principalmente a la contribución de los datos de CHIRPS, esto podría indicar que el reanálisis de ERA5 o el método de reducción de escala aplicado no son capaces de representar la variabilidad asociada a los océanos, aunque si la de la CLLJ (al menos para el IELL y TELL). Sin embargo, se deben tener en consideración los alcances de ERA5, este conjunto tiene originalmente una baja resolución comparado con la de CHIRPS, razón por la cual se aplicó el método de CA sobre los mismos y Guanacaste es una región con cierta complejidad orográfica debido a su diversidad en suelos y a la presencia de pequeños cerros dispersos en la provincia, así como la presencia de diversos cuerpos de agua e importantes humedales, de modo que la interacción de estos factores y las condiciones atmosféricas pueden ser más complejas y no capturadas por el reanálisis o el método de CA.

En esta investigación se encontró concordancia entre ERA5 y CHIRPS en términos climatológicos (ver figura A1 y cuadro A1 y A2 incluidos en el Anexo), pero no en las correlaciones de variabilidad climática contra índices oceánicos (ATN y N3.4), por lo que se debería trabajar también con datos de ERA5 que abarquen un periodo común con datos de estaciones meteorológicas o CHIRPS que ya se ha mostrado que representa bien la región [10], [30]. Lo anterior también permitiría comparar los datos de ERA5 con reducción de escala contra fuentes de variabilidad climática en el periodo de 1981-2020 para verificar si estos logran capturar la variabilidad climática asociada a los océanos como hace CHIRPS, ya que no fue posible determinar si ERA5 no explica de manera eficiente la variabilidad oceánica de la región debido a la propia base de datos, al método de reducción de escala aplicado de CA o al periodo utilizado.

Agradecimientos

Agradecemos a los proyectos B9454 (Fondo de Grupos), C3991 (UCREA), A1715, B0810, A5719, C2103, C3721 y A4906 (PESCTMA) inscritos a la Universidad de Costa Rica dentro de los cuales se enmarca este trabajo y del apoyo brindado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC), Ottawa, Canadá y el Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA) al proyecto RC4 (C4-468, CR-66, SIA 0054-23). Las opiniones aquí expresadas no representan necesariamente las del IDRC, CSUCA o las de la Junta de Gobernadores.

El autor Hugo Hidalgo revisó este artículo cuando se encontraba en licencia sabática de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

- [1] E. Alfaro, «Some Characteristics of the Annual Precipitation Cycle in Central America and their Relationships with its Surrounding Tropical Oceans», *Tópicos Meteorológicos Ocean.*, vol. 9, n.º 2, Art. n.º 2, 2002, doi: www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/15428.
- [2] S. G. Díaz, «Inicio de las lluvias de verano en las costas del Pacífico Mesoamericano». [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México], 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3466119>
- [3] R. H. Gramzow y W. K. Henry, «The Rainy Pentads of Central America», *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 11, n.º 4, Art. n.º 4, jun. 1972, doi: [10.1175/1520-0450\(1972\)011<0637:TRPOCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)011<0637:TRPOCA>2.0.CO;2).
- [4] J. A. Amador, «A Climate Feature of the Tropical Americas: The Trade Wind Easterly Jet», *Rev. Tópicos Meteorológicos Oceanográficos*, vol. 5, n.º 2, Art. n.º 2, jun. 1998.
- [5] J. A. Amador, «The Intra-Americas Sea low-level jet: overview and future research», *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1146, pp. 153-188, dic. 2008, doi: [10.1196/annals.1446.012](https://doi.org/10.1196/annals.1446.012).
- [6] D. Enfield y E. Alfaro, «The Dependence of Caribbean Rainfall on the Interaction of the Tropical Atlantic and Pacific Oceans», *J. Clim.*, vol. 12, n.º 7, Art. n.º 7, jul. 1999, doi: [10.1175/1520-0442\(1999\)012<2093:TDOCR O>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2093:TDOCR O>2.0.CO;2).
- [7] H. G. Hidalgo, A. M. Durán-Quesada, J. A. Amador, y E. Alfaro, «The Caribbean Low-Level Jet, the Inter-Tropical Convergence Zone and precipitation patterns in the Intra-Americas Sea: A proposed dynamical mechanism», *Geogr. Ann. Ser. Phys. Geogr.*, vol. 97, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2015, doi: [10.1111/geoa.12085](https://doi.org/10.1111/geoa.12085).
- [8] P. Ureña-Mora y E. Alfaro, «Comparación de métodos de detección del inicio y término de la estación lluviosa basado en datos de precipitación (Comparison of detection methods for the onset and demise of the rainy season based on precipitation)», *Rev. Tecnológica En Marcha*, 2022, doi: <https://doi.org/10.18845/tm.v35i4.5778>.
- [9] R. J. Bombardi, K. V. Pegion, J. L. Kinter, B. A. Cash, y J. M. Adams, «Sub-seasonal Predictability of the Onset and Demise of the Rainy Season over Monsoonal Regions», *Front. Earth Sci.*, vol. 5, 2017, doi: [10.3389/feart.2017.00014](https://doi.org/10.3389/feart.2017.00014).
- [10] K. Ugalde, «Estudio del inicio y término de la estación lluviosa en el Pacífico Norte de Costa Rica en el periodo 1950-2020», Tesis de licenciatura aprobada con distinción sobresaliente, Universidad de Costa Rica, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10669/89114>

- [11] C. Funk *et al.*, «The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes», *Sci. Data*, vol. 2, n.º 1, Art. n.º 1, dic. 2015, doi: 10.1038/sdata.2015.66.
- [12] D. B. Enfield, A. M. Mestas-Nuñez, y P. J. Trimble, «The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S.», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, n.º 10, pp. 2077-2080, 2001, doi: 10.1029/2000GL012745.
- [13] S. B. Goldenberg, C. W. Landsea, A. M. Mestas-Nuñez, y W. M. Gray, «The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implications», *Science*, vol. 293, n.º 5529, pp. 474-479, jul. 2001, doi: 10.1126/science.1060040.
- [14] J. A. Amador y E. J. Alfaro, «Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático», *Rev. Iberoam. Econ. Ecológica*, n.º 11, pp. 39-52, 2009.
- [15] T. Maldonado, E. J. Alfaro, J. A. Amador, y A. Rutgersson, «Regional precipitation estimations in Central America using the Weather Research and Forecast model», *Rev. Biol. Trop.*, vol. 66, n.º 1, pp. S231-S254, 2018, doi: <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.33303>.
- [16] H. G. Hidalgo, E. J. Alfaro, y P. M. Pérez-Briceño, «Cambios climáticos proyectados de modelos CMIP5 en La Cruz, Guanacaste, Costa Rica», *Rev. Biol. Trop.*, vol. 69, pp. 60-73, oct. 2021, doi: 10.15517/rbt.v69is2.48307.
- [17] H. G. Hidalgo, M. Dettinger, y D. Cayan, «Downscaling With Constructed Analogues: Daily Precipitation and Temperature Fields Over The United States», California Energy Commission PIER Final Project Report CEC-500-2007-123, 2008. Accedido: 20 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Downscaling-With-Constructed-Analogues%3A-Daily-and-Le%C3%B3n-Dettinger/2ccaf3294385bc206b751c466b4d6e2ceecf70af>
- [18] H. Hersbach *et al.*, «The ERA5 global reanalysis», *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 146, n.º 730, Art. n.º 730, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- [19] J. A. Amador, E. J. Alfaro, E. R. Rivera, y B. Calderón, «Climatic Features and Their Relationship with Tropical Cyclones Over the Intra-Americas Seas», en *Hurricanes and Climate Change: Volume 2*, J. B. Elsner, R. E. Hodges, J. C. Malmstadt, y K. N. Scheitlin, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 2010, pp. 149-173. doi: 10.1007/978-90-481-9510-7_9.
- [20] E. Alfaro, L. Cid, y D. Enfield, «Relaciones entre el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y los océanos Pacífico y Atlántico tropical», *Investig. Mar.*, vol. 26, pp. 59-69, 1998, doi: 10.4067/S0717-71781998002600006.
- [21] B. Fallas y E. Alfaro, «Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales. 1: Análisis de tablas de contingencia.», *Rev. Climatol.*, vol. 12, pp. 61-79, nov. 2012.
- [22] D. Poleo, E. Solano León, y W. Stolz, «La Oscilación atmosférica Madden-Julian (MJO) y las lluvias en Costa Rica», *Tópicos Meteorológicos Ocean.*, vol. 13, p. 58, jun. 2014.
- [23] K. E. Trenberth y D. P. Stepaniak, «Indices of El Niño Evolution», *J. Clim.*, vol. 14, n.º 8, Art. n.º 8, abr. 2001, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2.
- [24] K. H. Cook y E. K. Vizy, «Hydrodynamics of the Caribbean Low-Level Jet and Its Relationship to Precipitation», *J. Clim.*, vol. 23, n.º 6, pp. 1477-1494, mar. 2010, doi: 10.1175/2009JCLI3210.1.
- [25] D. S. Wilks, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 4.^a ed. Elsevier Science, 2019.
- [26] W. McKinney, «Data Structures for Statistical Computing in Python», presentado en Proceedings of the 9th Python in Science Conference, ene. 2010, pp. 56-61. doi: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.
- [27] C. R. Harris *et al.*, «Array programming with NumPy», *Nature*, vol. 585, n.º 7825, Art. n.º 7825, sep. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [28] E. Alfaro, F. J. Soley, y D. Enfield, *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas (Use of a Contingency Table for Climatic Applications)*. Guayaquil, Ecuador: ESPOL y FUNDESPOL, 2004. Accedido: 3 de marzo de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/76751>
- [29] E. Quirós y H. G. Hidalgo, «Variabilidad y conexiones climáticas de la zona de convergencia intertropical del Pacífico Este», *Rev. Tópicos Meteorológicos Ocean.*, vol. 15, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2016.
- [30] L. Quesada-Hernandez, «Respuesta de la hidrología superficial de la cuenca del río Tempisque a la variabilidad climática y cambio de cobertura de la tierra», 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.22256.20485.

Anexos

La figura A1 representa el promedio de precipitación diaria en el periodo de 1950-1980 en caso de los datos de ERA5 con reducción de escala y de 1981-2020 en caso de los datos de CHIRPS.

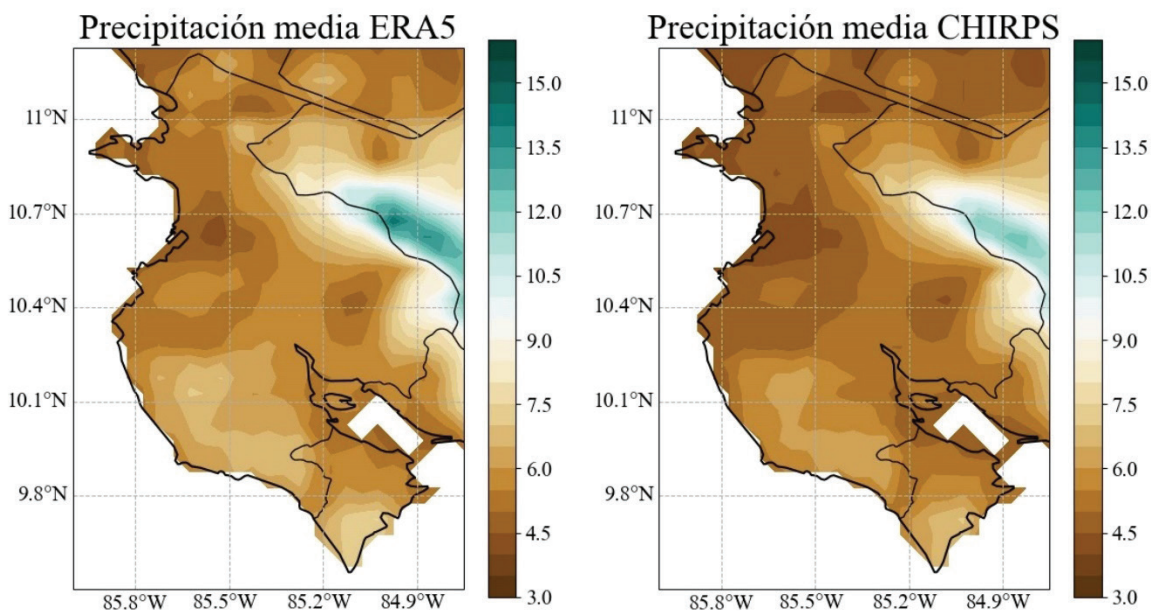


Figura A1. Precipitación media diaria ($\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) para los datos de ERA5 con reducción de escala, izquierda, (1950-1980) y CHIRPS, derecha (1981-2020).

Al aumentar la resolución de los datos de ERA5 por medio del ajuste de escala para que coincidan con la resolución de CHIRPS, se obtuvieron resultados que representan bien la región de Guanacaste en términos climatológicos. Ugalde [10] validó que los datos de CHIRPS capturan correctamente las precipitaciones en la región, por lo que es posible validar ERA5 usando CHIRPS. Ambos conjuntos de datos muestran los mismos núcleos de bajas precipitaciones (por ejemplo, los que se encuentran alrededor del cantón de Cañas y Liberia), también se observa un núcleo de altas precipitaciones al norte de la cordillera de Guanacaste, aunque este se escapa de la región de estudio. Los percentiles 25, 50, y 75 de los datos de ERA5 en la figura A1 son $P_{25} = 5.31 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, $P_{50} = 5.75 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y $P_{75} = 6.61 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, mientras que para el caso de CHIRPS son $P_{25} = 4.73 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, $P_{50} = 5.16 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y $P_{75} = 5.96 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ indicando que CHIRPS presenta menores precipitaciones. De los datos que componen la figura A1 se calculó el EMA y el índice KGE obteniendo valores de $0.65 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y 0.88 respectivamente, indicando que ambos mapas coinciden adecuadamente entre sí. Sin embargo, es conveniente realizar la comparativa con periodos iguales en ambos conjuntos de datos, lo que permitiría calcular métricas para validar los resultados como la correlación de Pearson, el EMA o el índice KGE.

Cuadro A1. Valores de los percentiles 25, 50 y 75 para el IELL, TELL, DES y DELL para los estadísticos: mediana, desviación estándar, rango inter cuartil y tendencias para ERA5.

Parámetros	IELL			TELL			DES			DELL		
	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{25}	P_{50}	P_{75}
Mediana	131	133	138	308	311	315	185	188	190	176	179	182
Desviación estándar	9,9	10,6	12,14	9,0	9,9	11,3	12,9	14,9	17,3	12,5	14,0	16,6
Rango inter cuartil	12,5	13,8	14,8	12,0	15,0	17,0	16,0	18,5	21,5	16,5	18,5	20,5
Tendencias	-0,21	-0,14	-0,05	0,10	0,22	0,33	-0,38	-0,22	-0,05	0,24	0,36	0,50

En la cuadro A1 se presenta un resumen numérico para los P_{25} , P_{50} y P_{75} , lo que ayuda a visualizar más claramente el comportamiento medio del IELL, TELL, DES y DELL para los estadísticos: mediana, desviación estándar, rango inter cuartil y tendencias para ERA5 y los umbrales entre los cuales se encuentra cada índice para el 50% de la región, en general mostrando un comportamiento similar al de CHIRPS [10]. Las tendencias de los cuatro índices de ERA5 muestran también un comportamiento similar a CHIRPS, hacia condiciones húmedas, sin embargo, según Ugalde [10], las regiones significativas difieren en ambos conjuntos de datos, y para ERA5 solo se pueden considerar relevantes el TELL y DELL. Las regiones significativas del TELL abarcan varios cantones en la región este de la provincia y este del golfo de Papagayo, mientras que las significancias de la DELL también abarcan las regiones anteriores solo que cubren un área un poco más amplia.

Cuadro A2. Comparaciones entre los estadísticos del IELL, TELL, DES y DELL calculados con CHIRPS y ERA5, usando el EMA, r_s y KGE.

Parámetros	IELL			TELL			DES			DELL		
	EMA	r_s	KGE	EMA	r_s	KGE	EMA	r_s	KGE	EMA	r_s	KGE
Mediana	2,36	0,93	0,77	2,75	0,46	0,46	4,17	0,77	0,66	4,18	0,76	0,68
Desviación estándar	1,39	0,39	0,40	3,03	0,53	0,64	3,56	0,45	0,51	3,31	0,45	0,64
Rango inter cuartil	2,27	-0,29	-0,31	4,55	0,51	0,20	4,06	0,36	0,35	4,70	0,02	0,12
Tendencias	0,11	0,46	-0,56	0,26	-0,05	-3,61	0,27	0,16	-0,05	0,27	0,05	-0,10

* En la correlación de Spearman valores en negrita representan significancia estadística al 99% ($\alpha < 0.01$).

En el cuadro A2 se presentan una comparación entre los estadísticos obtenidos con CHIRPS y los respectivos a ERA5. En términos climatológicos se puede apreciar que la mediana de ambos conjuntos de datos se corresponde bastante bien entre sí, en general con EMA bajos en los cuatro índices, además de r_s y KGE positivos (r_s significativo al 99%). La desviación estándar también se corresponde bien en los cuatro índices, mostrando valores de dispersión bastante similares entre ambos conjuntos. Sin embargo, para el rango inter cuartil este no es el caso, tanto el TELL como la DES muestran una correspondencia entre ERA5 y CHIRPS, pero el IELL y DELL no, el IELL muestra EMA bajos con un r_s y KGE negativos, mientras que en la DELL tanto la r_s y KGE son muy cercanos a cero. Para las tendencias el único caso que se puede resaltar es el r_s del IELL positivo (significativo) el resto de los índices muestran correlaciones muy bajas o incluso negativas.

En general la correspondencia entre CHIRPS y ERA5 es bastante buena para los índices del IELL, TELL, DES y DELL en el caso de la mediana, media (no mostrada, pero con resultados muy similares a la mediana) y desviación estándar, sin embargo, no sucede lo mismo en todos los casos del rango inter cuartil y para las tendencias solo se tiene un caso significativo a resaltar.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Versión mejorada del mapa digital de coberturas naturales de la primera edición hojas cartográficas de Costa Rica escala 1:25 000

Improved version of the digital map of
natural cover of the first edition cartographic
sheets of Costa Rica scale 1:25,000

Julio Calvo-Alvarado¹, Dorian Carvajal-Vanegas²,
Vladimir Jiménez-Salazar³, Marco Castro-Campos⁴

Fecha de recepción: 17 de agosto, 2023
Fecha de aprobación: 28 de enero, 2024

Calvo-Alvarado, J; Carvajal-Vanegas, D; Jiménez-Salazar, V;
Castro-Campos, M. Versión mejorada del mapa digital de co-
berturas naturales de la primera edición hojas cartográficas
de Costa Rica escala 1:25 000. *Tecnología en Marcha*. Vol.
37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 21-30.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6843>



- 1 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 jucalvo@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9555-6420>
- 2 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 dcarvajal@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-6603-2086>
- 3 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 vladjimenezs@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0006-4744-9501>
- 4 Consultor Independiente. Costa Rica.
 marcovcastro66@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-4683-2104>

Palabras clave

Bosques; manglares; uso del suelo; SIG; cartografía; Guanacaste.

Resumen

Los mapas de cobertura del suelo son muy importantes para comprender el proceso de cambio de uso de la tierra, así como para la conservación y la gestión racional de los recursos naturales. Sin embargo, en Costa Rica, la información detallada de la cartografía digital sólo está disponible después de la introducción de las imágenes Landsat y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la década de 1980's. Por lo tanto, es crucial recuperar información de las hojas cartográficas históricas para proporcionar una mejor línea de base histórica. En este artículo se explica el proceso de conversión y corrección del mapa digital de coberturas del suelo de la primera edición de las hojas cartográficas de Costa Rica, publicadas inicialmente en papel por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:25.000, basándose en fotografías aéreas tomadas en 1945. Estas hojas cartográficas contienen información valiosa sobre las coberturas terrestres de bosques, humedales, manglares, salinas y cuerpos de agua. Por lo tanto, el objetivo principal de este proyecto fue crear una capa única y corregida de coberturas naturales del suelo en formato digital para la Península de Nicoya, de acceso libre y gratuito al público a través de la plataforma del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica.

Keywords

Forest cover; mangrove; land cover; land use; GIS; cartography; Guanacaste.

Abstract

Land cover maps are crucial for understanding land use change and for conserving and wisely managing natural resources. However, detailed digital mapping information was only available in Costa Rica after the introduction of LANSAT images and the use of Geographic Information Systems (GIS) in the 1980s. Therefore, retrieving information from historical cartographic sheets is crucial to providing a better historical baseline for the Nicoya Peninsula of Costa Rica. This article explains the process of converting and improving the land cover map from the first edition of the cartographic sheets of Costa Rica into digital format. These sheets were initially published in print by the National Geographic Institute (IGN) at a scale of 1:25,000, based on aerial photographs taken in 1945. These cartographic sheets contain valuable information about the land covers of forests, wetlands, mangroves, salt pans, and water bodies. Hence, the primary objective of this project was to create a single and improved layer of natural land covers in digital format, which will be free and open access to the public through the National Territorial Information System (SNIT) platform of the National Geographic Institute of Costa Rica.

Introducción

El Pacífico Noroeste de Costa Rica es una región que por su clima y suelos ha tenido una gran importancia socioeconómica para el país, principalmente para el desarrollo agropecuario [1]-[2], esto ha impactado su cobertura boscosa original y en la actualidad son muy pocas las áreas de bosque maduro originales que se conservan [3]. Entre las coberturas naturales originales se resaltan el bosque deciduo tropical, bosque seco tropical, y los manglares como ecosistemas forestales muy vulnerables [4]-[5]. Esta zona presentó una reducida cobertura forestal en la

década de 1970 producto de la deforestación, y es en las últimas décadas que ha mostrado un aumento de la cobertura forestal, debido al abandono de tierras poco productivas y a la regeneración de bosques secundarios [6].

Para cuantificar los cambios de cobertura de bosques durante las últimas 5 décadas, se ha utilizado tecnología satelital, principalmente con imágenes de las misiones LANDSAT, QuickBird, Sentinel-1 y Sentinel-2, entre otras [7]-[8]-[9]-[10]-[11]. Un inconveniente del uso de las imágenes satelitales es que su uso civil empieza en los años 70's, dejando entonces el uso de fotografías aéreas como única alternativa para generar mapas detallados de coberturas naturales del suelo. Para Costa Rica, es posible disponer de información de las coberturas naturales anteriores a los años 70's extrayendo la información ya foto interpretada [12]- [13] en primeras hojas cartográficas del país. Hay que subrayar que la elaboración de estas hojas cartográficas se aplicó protocolos estandarizados internacionalmente, que garantizan su calidad y veracidad de la información [14].

La primera edición de hojas con escala 1:25000 fue publicada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) entre los años 1953 y 1962, consta de 99 hojas cartográficas basadas en vuelos realizados en 1945 [14, 15]. Estas hojas aparte de incluir información topográfica, incluyen la clasificación de coberturas naturales tales como bosques, humedales, manglares y cuerpos de agua. Esta información reviste de gran interés para comprender la dinámica histórica de la deforestación y el cambio de uso del suelo en la Región Chorotega [1] - [6] - [7] - [16].

En el año 2023, se publicó una primera versión de una capa digital [17] – [18] de las coberturas naturales del suelo de las hojas cartográficas 1: 25000 del año 1945. Sin embargo, esta primera versión no corrige los errores detectados en la clasificación de los manglares. La razón para no corregir la primera versión se debe a que el objetivo de ese proyecto fue crear una capa digital con la información tal como fue interpretada, clasificada y publicada originalmente en formato impreso por el IGN [17] - [15]. La intención de la primera versión fue dejar abierta la posibilidad a los usuarios del mapa de analizar, con su propio criterio, la pertinencia y/o oportunidad, según la información secundaria disponible que encuentren, de rectificar las clasificaciones originales de las hojas cartográficas.

Por tanto, los objetivos de este proyecto son: a) crear una capa digital mejorada de las coberturas naturales del suelo de la primera versión digital basada en las hojas cartográficas de Costa Rica escala 1:25 000 al reclasificar las categorías de manglar, pantano y ciénaga y b) disponer la nueva capa mejorada en formato digital y de acceso libre al público en la plataforma del SNIT del Instituto geográfico Nacional de Costa Rica.

Materiales y métodos (metodología)

Para la primera digitalización se utilizaron las 99 hojas cartográficas de Costa Rica, escala 1:25 000, basadas en fotografías aéreas (escala 1:20 000) tomadas principalmente en el año 1945 y publicadas en los años 1953 y 1962 [17]. Las áreas que abarcan estas hojas incluyen la Península de Nicoya (Guanacaste, Puntarenas), el sector fronterizo entre La Cruz y Peñas Blancas (Guanacaste) y varias hojas cartográficas de las provincias de Alajuela, San José y Cartago (figura 1). Las hojas cartográficas fueron adquiridas en formato digital y escaneadas a partir de las hojas cartográficas impresas originales por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Las hojas cartográficas fueron entregadas por el IGN en formato TIFF con una resolución de 72 PPI [17].

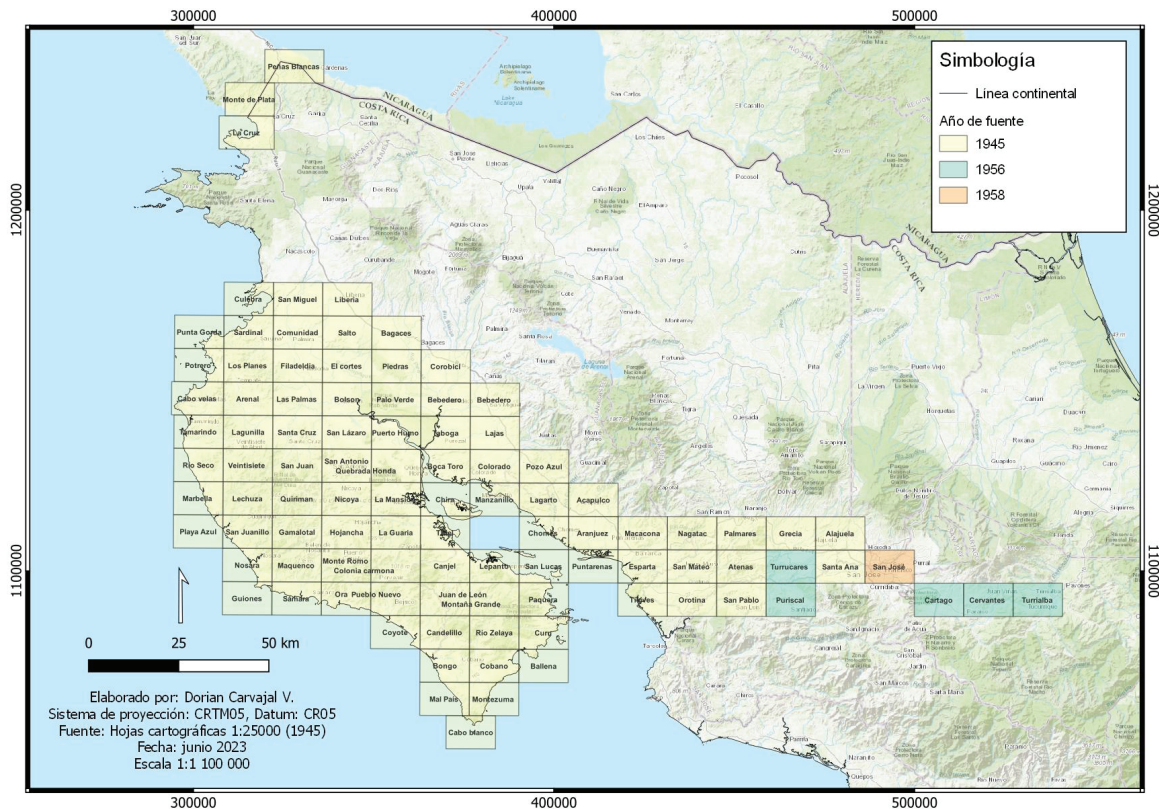


Figura 1. Hojas cartográficas 1:25 000 del año 1945 y publicadas entre 1953 y 1962 por el Instituto Geográfico Nacional.

En la primera versión cada una de las hojas cartográficas fue georreferenciada en el sistema de coordenadas oficial para Costa Rica CRTM05 con la herramienta GDAL de QGIS 3.16.3. Luego se realizó una digitalización manual de las diferentes coberturas a una escala fija 1:2 500 en un monitor de 24 pulgadas, con las herramientas avanzadas de digitalización de QGIS 3.16.3 [17]. Aunque existen metodologías para digitalizar automáticamente una imagen [12] - [13], se decidió por una digitalización manual al encontrar muchas diferencias de color y calidad de impresión entre las diferentes hojas cartográficas (Fig. 1), lo que significaría muchos errores de digitalización. Finalmente, después de la unión de cada hoja digitalizada, se realizó un control manual de calidad de la digitalización, a fin de detectar errores u omisiones en el proceso, el producto de esto, se creó una capa en formato vectorial para el área total que cubren las 99 hojas cartográficas [17] - [18].

Para la reclasificación de los polígonos de mangle, pantano y ciénagas, que presentaron errores de clasificación del “mangle”, se empleó la cobertura de mangle del Golfo de Nicoya realizado por el CATIE en el 2021 [19]. Además, se empleó las Ortofotos escala 1: 5000 del año 2017 del IGN para verificar el deslinde del mangle [20].

Resultados

Se digitalizaron 10 categorías de cobertura incluidas en las hojas cartográficas 1:25 000 de 1945 (figura 3), estas fueron: arena y lodo, bosque, laguna, laguna intermitente, manglar, pantano y ciénaga, playón, salinas, terreno inundable y otros usos. La clase de cobertura “otros usos” corresponde a actividades agropecuarias y zonas urbanas, que no fueron clasificadores

en las hojas cartográficas 1: 25 000. A manera de contexto histórico, los usos agropecuarios dominantes en esa región del país en esos años fueron: pasto, café y caña de azúcar [1] - [16] - [21]. Es importante notar que la figura 3 es ilustrativa de la capa corregida de la cobertura del suelo y por su escala no es posible apreciar todas las coberturas incluidas en el mapa, algo solo posible de apreciar si se despliega la capa digital en un SIG.

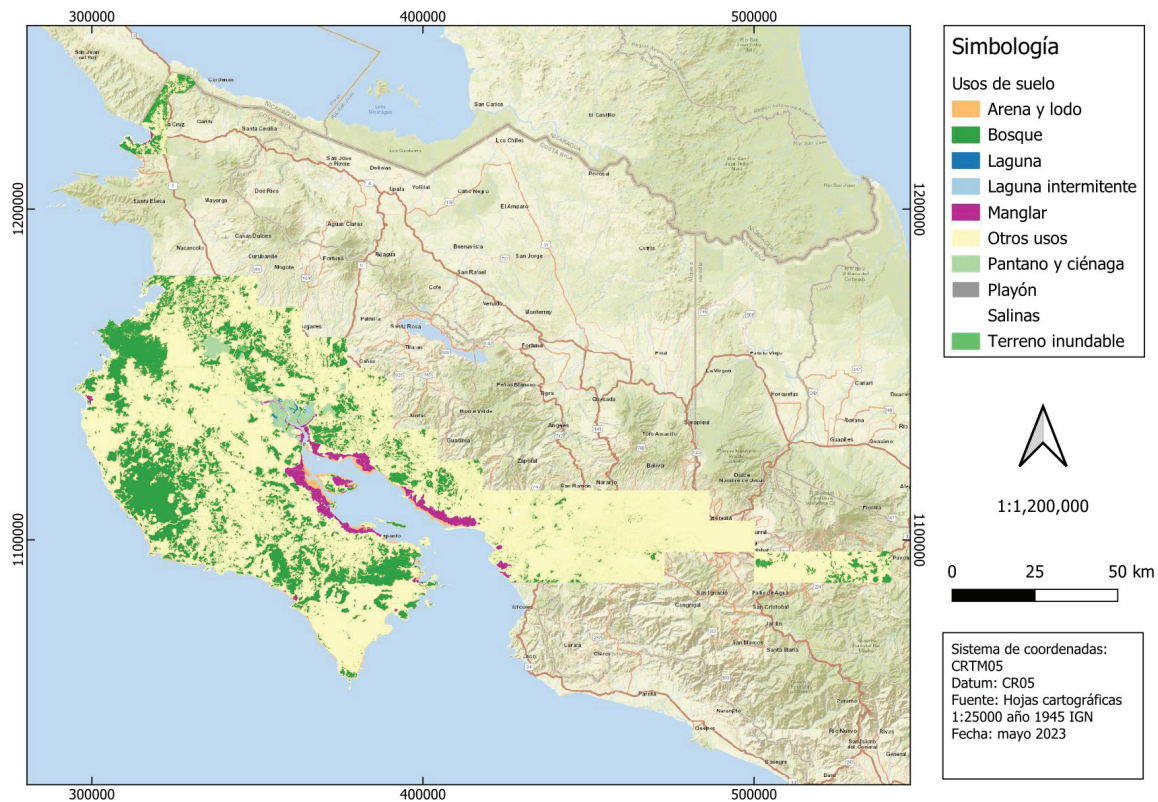


Figura 3. Mapa de Coberturas Naturales del suelo de las hojas cartográficas 1:25 000 del año 1945 del Instituto Geográfico Nacional.

Los errores residuales de georreferenciación de las hojas cartográficas escaneadas, en las coordenadas “X” y “Y”, se mantuvieron inferiores a 10 m en las hojas cartográficas 1:25 000. Algunas posibles fuentes de error asociadas a este error residual son: deformación de las hojas cartográficas impresas al momento de escanearse y calidad de la impresión original de las hojas cartográficas [17]. Estos errores de georreferenciación están por debajo del valor del error aceptable según las recomendaciones de la USGS [22], que indican que el error máximo debe ser de 12.7 m para la escala de 1:25 000.

La digitalización de todas las coberturas resultó en unidades de mapeo ≥ 0.02 ha. En la primera versión y ni en esta versión mejorada se limitó el tamaño las unidades de mapeo, dado que el objetivo es representar en formato digital las coberturas tal como se clasificaron en hojas cartográficas escaneadas.

Los errores de digitalización como omisión de polígonos, imprecisión en la digitalización y asignación equivocada de clase de cobertura, fueron muy pocos y todos fueron corregidos durante el proceso de verificación realizado. Los errores en la delineación de polígonos que no se pudieron resolver en algunas hojas cartográficas, se relacionan con las discrepancias al empatar hojas cartográficas en la fase de fotointerpretación, lo que justifica evidentes cortes

rectos y uniones desacopladas en los polígonos compartidos de varias hojas cartográficas. Finalmente se debe señalar que, aunque el escaneo de las hojas cartográficas fue de baja resolución, esto no representó ninguna limitación en el proceso de digitalización y por tanto no hubo pérdida de información.



Figura 4. Inconsistencia en la clasificación del manglar en la hoja cartográfica “Mansión” escala 1:25 000.

Con respecto a los errores de la clasificación del manglar en las hojas cartográficas, en la figura 4 se observa dos categorías asociadas, una que se clasifican como “manglar” (color magenta) y otra como “pantano/ciénaga” (color celeste). No obstante, ambas categorías corresponden al ecosistema “manglar” y más específicamente al mangle alto (mangeta) y mangle bajo (celeste), que presentan notables diferencias en cuanto a estructura y composición de especies, como resultado del efecto de una gradiente de salinidad. Este error también se hace evidente al comparar la misma sección de la hoja cartográfica “Mansión” 1:25 000 con la imagen ortofoto del año 2017 (figura 4). Por lo tanto, se decidió reclasificar los polígonos “pantano y ciénaga” a “mangle” (Figura 5). Esta rectificación de cobertura del mangle de 1945 aumentó el área de cobertura hasta en 40,45 km², y disminuye el área de la cobertura “pantano y ciénaga” en la misma extensión, cambiando a la vez sus respectivos porcentajes (Cuadro 1). Luego se contrastó la clasificación corregida del mangle con el mapa de manglares del Golfo de Nicoya del CATIE (19), para así verificar que las áreas de manglar se encuentran correctamente delineados y no incluyen áreas ajenas al manglar.

La cobertura de bosques, clasificada con fotografías aéreas del año 1945 y a escala 1:25 000, se considera muy precisa en tanto que para ese año la mayoría de los bosques correspondía a estados de sucesión tardíos y por lo tanto eran una cobertura muy conspicua de detectar y diferenciar de otras coberturas (ej. café, frutales). Las unidades de mapeo tan pequeñas (≥ 0.02 ha) corresponden en su mayoría a grupos de árboles o árboles individuales con grandes copas creciendo en potreros tales como Guanacaste, Cenízaro e Higuerones. Las otras coberturas naturales, a parte del mangle y los bosques, no fueron revisadas dado que no hay forma de verificar su clasificación. Por ejemplo, muchos de los humedales, terrenos inundados y lagunas han sido drenados desde entonces. A pesar de este inconveniente, dichas coberturas se mantienen en su forma original en esta capa mejorada con el fin de que los usuarios mismos decidan como analizar esta información.

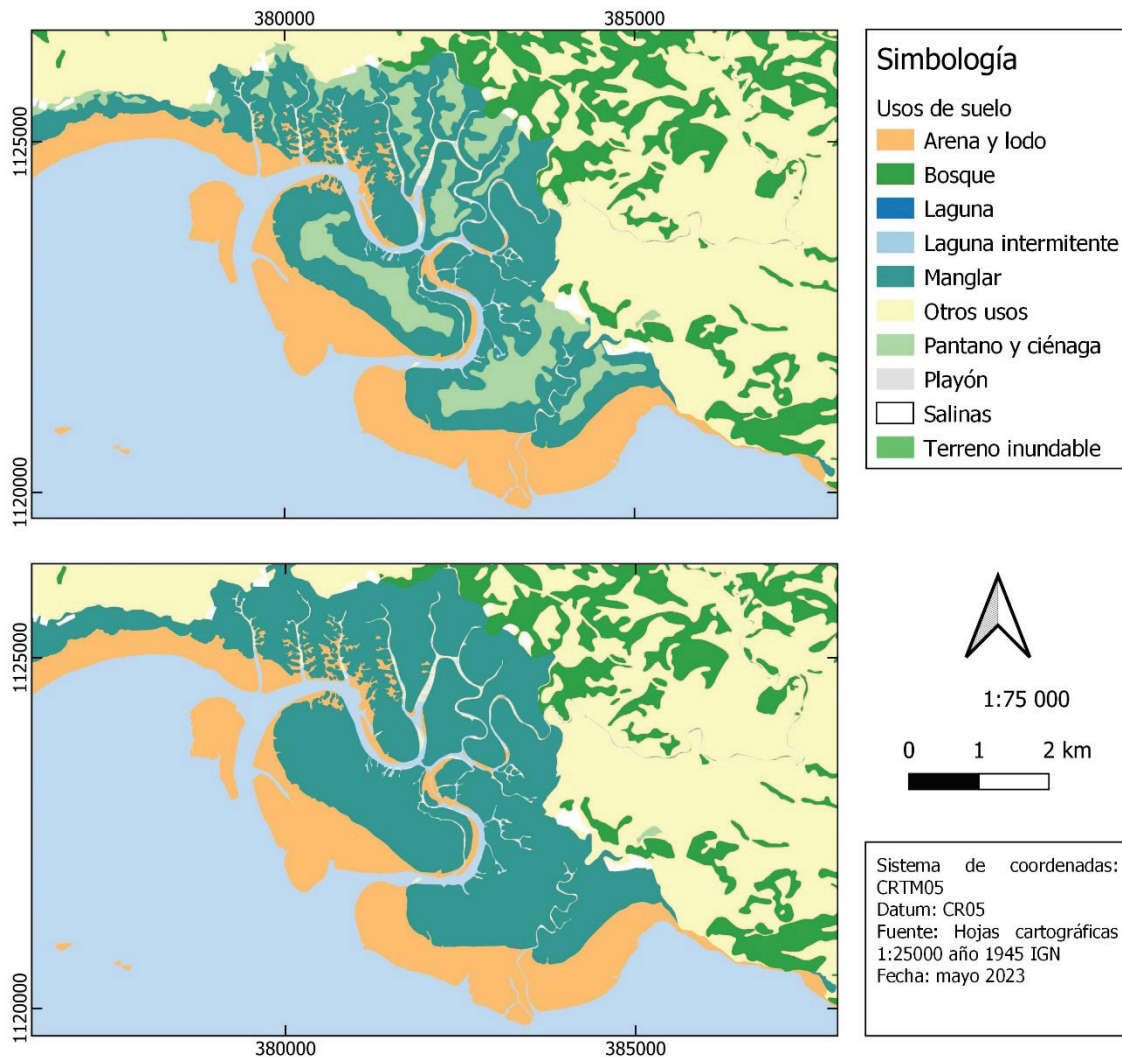


Figura 5. Detalle de las áreas de pantano y ciénaga (verde claro) que se reclasifican a manglar (verde oscuro). Hoja cartográfica “Manzanillo”.

Desde la primera versión digital se observó que algunas hojas cartográficas presentaban una fotointerpretación incompleta, particularmente las hojas cartográficas “Marbella”, “Villareal” y “Tamarindo”, que muestran notable errores de empates o cortes rectos de sus polígonos compartidos con hojas cartográficas colindantes. En esa misma línea se señala que 8 hojas cartográficas definidas dentro del triángulo de las hojas “Bongo-Curu-Cabo Blanco”, denotan una situación similar, algo que se puede observar en la figura 3. Por lo tanto, la información contenida en las hojas cartográficas señaladas debe emplearse con reservas dado que existe la posibilidad de una omisión en la detección y clasificación de todos los polígonos de coberturas naturales en el proceso de fotointerpretación, dando lugar a una posible subestimación de la extensión de esas coberturas.

Cuadro 1. Área en kilómetros cuadrados (km²) y porcentaje (%) por coberturas naturales de las capas de hojas cartográficas escaneadas 1:25 000 para la clasificación original y la corregida.

Cobertura	Clasificación original [17]		Clasificación corregida (esta publicación)	
	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Otros usos	6338,62	62,67	6338,62	62,67
Bosque	3330,25	32,93	3330,25	32,93
Pantano y ciénaga	212,07	2,10	171,62	1,70
Manglar	142,68	1,41	183,13	1,81
Arena y lodo	69,06	0,68	69,06	0,68
Playón	8,52	0,08	8,52	0,08
Lagunas	4,62	0,05	4,62	0,05
Salinas	2,89	0,03	2,89	0,03
Terreno inundable	2,77	0,03	2,77	0,03
Laguna intermitente	1,77	0,02	1,77	0,02
Total	10113,25	100,00	10113,25	100,00

En el cuadro 1 se presentan los valores para cada cobertura digitalizada al año 1945 según la clasificación original [17] y la clasificación corregida para las hojas cartográficas 1:25 000, para un total de área digitalizada de 10 113, 25 km². Según la clasificación corregida casi dos terceras partes corresponden a otros usos, que para 1945 correspondían principalmente a agricultura y ganadería de carne [16] en los cantones de la provincia de Guanacaste y de Puntarenas, mientras que otro tercio del área es reportada como cobertura de bosques. Otra cobertura de gran importancia comercial y ecológica son los manglares que representan un 1,81% del área total [23]- [20].

Conclusiones y recomendaciones

El resultado principal de este proyecto fue crear una capa digital única y corregida de coberturas naturales del suelo la Primera Edición Hojas Cartográficas de Costa Rica escala 1:25 000, con acceso libre y gratuito al público a través de la plataforma del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica.

La única corrección realizada fue la reclasificación de la cobertura “Mangle”, que toma en cuenta las diferencias de estructura y composición de especies debido a los efectos la gradiente de salinidad. Esta reclasificación fue contrastada además con mapeos del mangle en Golfo de Nicoya más recientes y con el uso de las ortofotos del 2017, lo que asegura que la cobertura de mangle esta delimitada con un error mínimo.

De las 99 hojas cartográficas analizadas al menos 11 hojas presentan una clasificación dudosa de la cobertura de bosques, esto debido a dos posibles razones: a) la primera se asocia con una fotointerpretación incompleta y b) la segunda con el uso de fotografías aéreas posteriores a año 1945 y que no se indicaron en las fichas de cada hoja. Por esta razón la interpretación de las coberturas de estas hojas cartográficas se debe tomar con reservas.

Dado que los errores de digitalización de las hojas cartográficas resultaron menores de los valores máximos recomendados y que las unidades de mapeo son $\geq 0,02$ hectáreas se considera que esta capa tiene una excelente resolución y exactitud geográfica.

Reconocimientos

Los autores reconocen el apoyo recibido por parte de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica con el Proyecto de Investigación número 1401095, del Centro de Innovación e Investigación Forestal (CIIF-TEC) y de la Fundación MarViva. Se agradece al IGN la cooperación al suministrar el material cartográfico y al CeNAT-CONARE por hospedar en sus servidores la cartografía digital generada en este estudio en el nodo del PRIAS (CeNat) incorporado al SNIT del IGN.

Disponibilidad de datos

Las hojas cartográficas escaneadas año 1945, escala 1: 25000, están disponibles en el IGN a través de solicitud escrita a la Dirección del IGN. Toda la información que contiene la cartografía generada en este artículo es de acceso libre al público en el sitio SNIT del Instituto Geográfico Nacional. Por lo tanto, no se requiere de permiso alguno para utilizar las Cartografía Digital generada, pero se solicita reconocer la fuente de información y la autoría, según la cita sugerida a continuación:

Mapa Versión Mejorada

Carvajal, D., Jiménez, V., Castro-Campos, M. y J. Calvo-Alvarado, J. (2024). *Versión mejorada del Mapa digital de Coberturas Naturales digitalizadas de la Primera Edición Hojas Cartográficas escala 1:25 000*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Fundación MarViva. Cartago, Costa Rica. Dirección SNIT: https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6NDE=&nombre=CARTOGRAF%C3%8DA%20PRIAS

Referencias

- [1] J. Calvo-Alvarado, B. McLennan, A. Sánchez-Azofeifa and T. Garvin, "Deforestation and forest restoration in Guanacaste, Costa Rica: Putting conservation policies in context," *For.Ecol.Manage.*, vol. 258, no. 6, pp. 931-940, 2009.
- [2] D.H. Janzen, W. Hallwachs and M. Kappelle, "Biodiversity conservation history and future in Costa Rica: The case of Área de Conservación Guanacaste (ACG)," *Costa Rican Ecosystems*, vol. 290, 2016.
- [3] J.S. Powers, J.M. Becknell, J. Irving and D. Perez-Aviles, "Diversity and structure of regenerating tropical dry forests in Costa Rica: Geographic patterns and environmental drivers," *For.Ecol.Manage.*, vol. 258, no. 6, pp. 959-970, 2009.
- [4] M. Quesada and K.E. Stoner, "Threats to the conservation of the tropical dry forest in Costa Rica," *Biodiversity conservation in Costa Rica: Learning the lessons in a seasonal dry forest*, pp. 266-280, 2004.
- [5] M. Hernández-Blanco, R. Costanza, and M. Cifuentes-Jara, "Economic valuation of the ecosystem services provided by the mangroves of the Gulf of Nicoya using a hybrid methodology," vol. 49, p. 101258, 2021.
- [6] J. Calvo-Alvarado, V. Jiménez, A. Calvo-Obando, and M. Castillo, "Current perspectives on forest recovery trends in Guanacaste, Costa Rica," vol. 21, no. 4, pp. 425-431, 2019.
- [7] R. C. Montoya, H. A. Mairena, and J. C. C. Alvarado, "Cambio de la cobertura de la tierra para el Área de Conservación Tempisque 1998-2003, Guanacaste, Costa Rica.," vol. 5, no. 15, pp. 1-15, 2008.
- [8] I. D. Ávila-Pérez, E. Ortiz-Malavassi, C. Soto-Montoya, Y. Vargas-Solano, H. Aguilar-Arias, and C. Miller-Granados, "Evaluación de cuatro algoritmos de clasificación de imágenes satelitales Landsat-8 y Sentinel-2 para la identificación de cobertura boscosa en paisajes altamente fragmentados en Costa Rica," no. 57, pp. 37-49, 2020.
- [9] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). (2015). *Cartografía base para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2013-2014*. Preparado por Ortiz, E. et al. como consultor para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica, dentro del marco del Programa REDD/CCAD/GIZ. San José, Costa Rica. 52 pp.
- [10] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) 2023. *Mapa de Bosques y otras Coberturas de la Tierra 2021 para Proyecto Inventario Forestal Nacional*. Proyecto Costa Rica REDD+ Pago Basado en Resultados 2014-2015. PNUD-SINAC-FONAFIFO- (Documento en Borrador)

- [11] Quesada, C., Sánchez-Azofeifa, A. y Calvo-Alvarado, J. 1998. Estudio de cambios de cobertura forestal de Costa Rica, 1987-1997. Centro Científico Tropical, Universidad de Costa Rica, Conservation International. Estudio elaborado para el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO). 50 pp.
- [12] Chen, Y. Y., Huang, W., Wang, W. H., Juang, J. Y., Hong, J. S., Kato, T., & Luysaert, S. 2019. Reconstructing Taiwan's land cover changes between 1904 and 2015 from historical maps and satellite images. *Scientific reports*, 9(1), 3643. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40063-1>
- [13] C. Nelson, B. Lasagna, D. Holtgrieve, and M. Quinn, "The Central Valley historic mapping project," 2003.
- [14] G. Sandner, "La Cartografía Centroamericana. Su desarrollo e importancia para la economía y planificación," *Revista Geográfica de América Central*, vol. 1, no. 15-16, pp. 119-140, 1983.
- [15] Ficha Cartalográfica. Costa Rica 1:25 0000 IGN, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/resources/pdfcards/card001574.pdf>
- [16] D. H. Janzen, *Guanacaste National Park: tropical ecological and cultural restoration*. EUNED, 1986.
- [17] Calvo-Alvarado, J., Jiménez, V., Carvajal, D. y Castro Campos, M. (2023). Coberturas Naturales digitalizadas de I Edición de Hojas Cartográficas escalas 1:25 000 y 1:50 000 de Costa Rica. Informe Técnico. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Fundación MarViva. Cartago, Costa Rica. 38 pp. URL:<https://hdl.handle.net/2238/14626>
- [18] Carvajal, D., Jiménez, V., Castro-Campos, M. y J. Calvo-Alvarado, J. (2023). Mapa digital de Coberturas Naturales digitalizadas de la Primera Edición Hojas Cartográficas escala 1:25 000. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Fundación MarViva. Cartago, Costa Rica. Dirección SNIT: https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6NDE=&nombre=CARTOGRAF%C3%8DA%20PRIAS
- [19] CATIE, "Mapa Ecosistemas de Manglar Costa Rica 2021", <https://www.arcgis.com/apps/dashboards/6fdbbbbc31ab4efe875f282ae5bc1b78> (Consultado 8 jun., 2023).
- [20] SNIT (snitcr.go.cr)
- [21] M. Edelman, "Extensive land use and the logic of the latifundio: a case study in Guanacaste Province, Costa Rica," *Human Ecology*, vol. 13, pp. 153-185, 1985.
- [22] Map Accuracy Standards. USGS, 1999. [En línea]. Disponible: <https://pubs.usgs.gov/fs/1999/0171/report.pdf>
- [23] E. S. Rivera and S. W. Casa, "Una descripción del valor de los bienes y servicios ambientales prestados por los manglares," *Gaceta ecológica*, no. 74, pp. 54-68, 2005.
- [24] P. Zamora-Trejos and J. Cortés, "Los manglares de Costa Rica: el Pacífico norte," *Revista de Biología Tropical*, vol. 57, no. 3, pp. 473-488, 2009.
- [25] C. Benavides-Varela, J. Samper-Villarreal, and J. Cortés, "Cambios en la cobertura de manglares en Bahía Culebra, Pacífico Norte de Costa Rica (1945-2010), *Revista de Biología Tropical*," vol. 64, no. 3, pp. 955-964, 2016.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA Grammary. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.

Además, utilizamos la herramienta de inteligencia artificial traductor de Word para traducir partes de este artículo. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.

Propuesta de mejoras para la implementación del monitoreo de residuos sólidos mediante el PRONAMEC en las Áreas Marinas Protegidas de Costa Rica¹

Proposal for Improvements for the Implementation of solid waste monitoring through PRONAMEC in the Marine Protected Areas of Costa Rica

Sofía Fallas-Flores², Lilliana Abarca-Guerrero³, Karol Ulate-Naranjo⁴




Fecha de recepción: 5 de septiembre, 2023

Fecha de aprobación: 18 de enero, 2024

Fallas-Flores, S; Abarca-Guerrero, L; Ulate-Naranjo, K. Propuesta de mejoras para la implementación del monitoreo de residuos sólidos mediante el PRONAMEC en las Áreas Marinas Protegidas de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 31-47.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6882>



- 1 Artículo basado en tesis de licenciatura de la primera autora. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14021>
- 2 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 sofiafallas4@gmail.com
- 3 Escuela de Química, Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 labarca@itcr.ac.cr
- 4 Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional. Costa Rica.
 karol.ulate.naranjo@una.ac.cr

Palabras clave

Residuos sólidos; monitoreo; PRONAMEC; Áreas Marinas Protegidas.

Resumen

Los residuos marinos son uno de los mayores retos ambientales a los que se enfrenta actualmente la humanidad. Costa Rica no es la excepción al problema de contaminación marina ya que gran cantidad de riqueza natural marino costera se está viendo afectada. Las Áreas Marinas Protegidas (AMPs) en Costa Rica resguardan una gran variedad de ecosistemas. Desde su creación, se han hecho esfuerzos para la protección de estas áreas y se ha encontrado la necesidad de implementar un plan de monitoreo para evaluar los cambios que se producen en cuanto a su biodiversidad. El Programa Nacional de Monitoreo Ecológico (PRONAMEC) en el Protocolo para Playas Arenosas tiene un indicador de residuos sólidos, no obstante, la información recopilada mediante la aplicación de este aún no se ha reportado de manera oficial, siendo solamente 3 AMPs las que lo han aplicado (Refugio Nacional de Vida Silvestre Playa Hermosa-Punta Mala, Parque Nacional Marino Las Baulas y la Reserva Biológica Isla del Caño). El propósito del estudio fue identificar las acciones necesarias para la implementación del monitoreo de residuos sólidos, mediante el PRONAMEC, en las AMPs del país, en conjunto con lo establecido en el Plan Nacional de Residuos Marinos de Costa Rica (PNRM) 2021-2030, así como proponer mejoras para la aplicación de este, tomando en cuenta las barreras que existen. Se aplicó una encuesta a 15 encargados de AMPs para conocer la situación del monitoreo de residuos. Se tomaron muestras de residuos en algunas AMPs para determinar la facilidad de implementación del protocolo, y se solicitaron registros del indicador de residuos marinos de algunas AMPs que lo han aplicado, para analizarlos y reportarlos junto a los obtenidos en la presente investigación robusteciendo el sistema para la toma de decisiones nacionales.

Keywords

Solid waste; monitoring; PRONAMEC; Marine Protected Areas.

Abstract

Marine debris is one of the greatest environmental challenges humanity is currently facing. Costa Rica is not the exception to the problem of marine pollution; large coastal marine natural wealth is being affected. The Marine Protected Areas (MPAs) in Costa Rica protect a great variety of ecosystems. Since their creation, efforts have been made to protect these areas and the need has been found to implement a monitoring plan to evaluate the changes that occur in terms of their biodiversity. The National Ecological Monitoring Program (PRONAMEC) aims to generate and disseminate reliable scientific information on the conservation of the country's biodiversity for local and national decision-making, in terrestrial, continental and marine waters. PRONAMEC in the Protocol for Sandy Beaches has a litter indicator, however, the information collected through its application has not yet been officially reported, with only 3 MPAs having applied it (Refugio Nacional de Vida Silvestre Playa Hermosa-Punta Mala, Parque Nacional Marino Las Baulas y la Reserva Biológica Isla del Caño). The purpose of this article is to report the necessary actions for the implementation of litter monitoring, through PRONAMEC, in the country's MPAs, overall, with the provisions of the National Marine Waste Plan of Costa Rica (PNRM) 2021- 2030, as well as proposed improvements for its application, considering the barriers that exist. A survey was applied to 15 AMPs managers to determinate the status of litter monitoring. Residue samples were taken in some MPAs to determinate the ease of implementation of the protocol and obtain the first data, and records of marine debris which were requested from some MPAs that have applied it, to analyze and report them together with those obtained in the present investigation, strengthening the system for national decision making.

Introducción

Los residuos marinos son uno de los mayores retos ambientales a los que se enfrenta actualmente la humanidad, afectando la riqueza natural marino costera, deteriorando el paisaje costero y generando efectos humanos negativos [1]. Costa Rica no es la excepción al problema ya que se producen aproximadamente 4000 toneladas diarias de residuos sólidos, de los cuales, el 25% terminan en ríos y playas [1].

En el país, existen áreas declaradas de significado especial por sus ecosistemas, la presencia de especies amenazadas, la repercusión en la reproducción y otras necesidades, así como por su significado histórico y cultural, llamadas Áreas Silvestres Protegidas (ASP) [2]. En cuanto a contaminación por residuos sólidos, en muchas de estas AMPs no se aplica un monitoreo de residuos sólidos que permita conocer la cantidad, fuente y comportamiento de estos, que sean útiles para la toma de decisiones nacionales.

Existen protocolos establecidos por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) que han sido desarrollados a través del Programa Nacional de Monitoreo Ecológico (PRONAMEC), de los cuales existe un único indicador de residuos sólidos que se aplica en Playas Arenosas [3], pero aún no se ha reportado de manera oficial los resultados de la implementación de dicho indicador, siendo solamente 3 AMPs las que lo han aplicado (Refugio Nacional de Vida Silvestre Playa Hermosa-Punta Mala, Parque Nacional Marino Las Baulas y la Reserva Biológica Isla del Caño). El propósito del presente artículo es presentar la información del estudio del indicador de residuos sólidos en Playas Arenosas del Protocolo de Monitoreo del PRONAMEC (SINAC), comparar y discutir los datos obtenidos en este estudio con el fin de identificar algunas acciones necesarias para la efectiva implementación de este indicador en las AMPs, y proponer mejoras a la herramienta nacional oficializada para el almacenamiento de datos de residuos marinos.

Marco Teórico

Situación en zonas costeras de Costa Rica

En Costa Rica se producen aproximadamente 4000 toneladas diarias de residuos sólidos, de los cuales, el 25% terminan en ríos y playas. Estudios indican que alrededor de 110 toneladas diarias de plástico se acumulan en el ambiente y la tendencia es que la cifra aumente cada año [1]. El Ministerio de Hacienda reporta una producción anual de al menos 600 millones de botellas de plástico desechables, de las cuales casi el 90% no son recolectadas y terminan acumuladas en cuencas hidrográficas, costas y ambientes marinos [1].

Se ha reportado en el documento de línea base del Plan Nacional de Residuos Marinos 2021-2030 que la investigación en temas de residuos marinos en Costa Rica es incipiente y se desarrolla principalmente en las instituciones de educación superior [4], y que los estudios sobre residuos en las costas, incluyendo microplásticos (<5 mm) y macroplásticos (≥25 mm) [5] en playas de Costa Rica, es muy escasa. Distintos grupos de investigación han enfocado sus esfuerzos en la generación de datos [6]. A continuación, se mencionan algunos de estos esfuerzos realizados en Costa Rica:

- En octubre del 2019, la Universidad de Costa Rica (UCR) inicia un primer estudio en las playas de las costas del Pacífico y del Caribe con el objetivo de crear una línea de investigación [7].
- En el 2020 se aprueba un proyecto del Fondo Especial de la Educación Superior (FEES) que involucra un grupo de investigación multidisciplinario de la Universidad Nacional (UNA), el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y la UCR. Este propone determinar microplásticos en los sectores pesqueros del Golfo de Nicoya y Golfo Dulce, para su posterior comparación [6].

- Actualmente se trabaja en temas relacionados con: monitoreo, metodología para limpieza de playas, gestión de artes de pesca, microplásticos en ambientes y organismos acuáticos de consumo humano y su incidencia en la salud pública y estado de los ecosistemas de arrecifes rocosos de las Áreas Marinas Protegidas [4].
- Además, se desarrolla actualmente el proyecto GloLitter en Costa Rica, que apoya a los países en desarrollo hacia la implementación y el cumplimiento de los marcos regulatorios internacionales, así como buenas prácticas para la prevención, reducción y control de residuos plásticos marinos procedentes de actividades en el mar [8].
- Otro proyecto en ejecución es el que lleva por nombre Prevención de los Residuos Marinos en el mar Caribe (PROMAR) cuyo objetivo es reducir la cantidad de residuos plásticos que llegan al Mar Caribe desde fuentes terrestres promoviendo soluciones de economía circular en Costa Rica, República Dominicana y Colombia [4].

A pesar de estos estudios, Costa Rica ha tenido una deuda histórica con la protección de su riqueza marina, presentando un rezago en la conservación y manejo de la biodiversidad marina y costera, sobre todo si se compara con su esfuerzo realizado hacia la parte terrestre [9]. Sin embargo, durante el 2021 se firmó la ampliación de la cobertura marina de un 2,7% a un 30% para el 2030, ampliando el Parque Nacional Isla del Coco de 2.034 km² a 54.844 km² e incluirá la conservación de Montes Submarinos, y el Área Marina de Manejo del Bicentenario de 9.649 km² a 106.285.56 km² [10].

Monitoreo ambiental

El monitoreo ecológico o ambiental permite realizar un proceso continuo en el tiempo de recolección, análisis y difusión apropiada de información sobre un conjunto específico de variables o indicadores [11].

Las Áreas Silvestres Protegidas (ASP) son zonas geográficas delimitadas, constituidas por terrenos, humedales y porciones de mar. Han sido declaradas como tales por representar un significado especial por sus ecosistemas, la existencia de especies amenazadas, la repercusión en la reproducción y otras necesidades y por su significado histórico y cultural. Estas áreas estarán dedicadas a la conservación y a la protección de la biodiversidad, el suelo, el recurso hídrico, los recursos culturales y los servicios de los ecosistemas en general (Artículo 58 Ley de Biodiversidad N°7788) [2], [12].

El PRONAMEC es una propuesta metodológica para el seguimiento y evaluación del estado o tendencias de la biodiversidad a nivel nacional, en forma interinstitucional, rigurosa y práctica [13].

En Costa Rica existen diferentes metodologías de recolección y monitoreo de residuos sólidos. La utilizada en el presente estudio es la que pertenece al PRONAMEC, denominado Protocolo de Playas Arenosas, el cual es el único que posee un indicador de residuos marinos. Este se denota como número 5 y se denomina Basura en la playa [14], desarrollado por García *et al.* [3], el cual consiste en tomar los residuos en una franja de 3 m de ancho y 100 m de longitud, paralela al mar, sobre la berma. Se procede a separar, contar, medir o pesar cada pieza recolectada, salvo estructuras de metal, piezas de madera mayores de 1 m² y desechos sanitarios (que se anotan como presentes). Para su análisis, los residuos se clasifican en cinco grupos generales: vidrios, metales, plásticos, materiales celulósicos y otros. Los resultados se expresan como porcentaje de unidades/100 m. Se anota el criterio sobre la percepción del grado de contaminación de la playa, empleando una escala de (1) limpia, (2) moderadamente sucia (entender como moderadamente limpia), (3) sucia, (4) muy sucia a criterio del tomador de datos; que se le asigna como categoría a la playa. Para ingresar la información a la base de datos se debe indicar la localidad, la fecha, la cantidad pesada de residuos según la categorización recolectada en el transecto. La hoja de Excel propuesta por el protocolo expresa los datos en porcentajes.

Metodología

El estudio consistió en una recolección de información a partir de octubre del año 2021 de forma cualitativa y cuantitativa en algunas playas arenosas de Áreas Marinas Protegidas del país, con el fin de determinar el estado de la implementación de un monitoreo de residuos sólidos en las AMPs de Costa Rica. A continuación, se presenta la forma de obtención de información para cada uno de los tres objetivos de la investigación.

Sitio

Existen 48 Áreas Marinas Protegidas en el país, algunas de ellas con porción de mar, otras con zona de playa y otras con ambas. De las Áreas que poseen porción de mar protegida, 20 se encuentran en el Pacífico y 3 en el Caribe, y, algunas de ellas, a su vez poseen costa. Las restantes solo poseen zona costera y no porción de mar protegida. Se estudiaron las zonas que poseen zona de costera o de playa y que poseen una porción de mar en su administración. En resumen, se estudiaron 12 AMPs en el Pacífico, y 3 en el Caribe, con costa y porción de mar protegida. En el cuadro 1 muestra las AMPs que fueron estudiadas, al Área de Conservación que pertenecen y su extensión.

Cuadro 1. Áreas Marinas Protegidas analizadas y algunas de sus características.

Categoría de manejo	ASP	Área de Conservación	Área Marina Protegida (km ²)	Línea de costa (km)
En el litoral Pacífico				
Parque Nacional	Santa Rosa	Área de Conservación Guanacaste	463,91	51,65
	Marino Las Baulas	Área de Conservación Tempisque	253,19	15,57
	Marino Ballena	Área de Conservación Osa	52,3	14,68
	Manuel Antonio	Área de Conservación Pacífico Central	1.244,78	25,38
	Corcovado	Área de Conservación Osa	20,45	41,33
	Piedras Blancas	Área de Conservación Osa	13,56	6,95
	Isla del Coco	Área de Conservación Marina Isla del Coco	1.948,30	30,87
Refugio Nacional de Vida Silvestre	Ostional	Área de Conservación Tempisque	80,55	17,86
	Caletas-Ario	Área de Conservación Tempisque	200,11	9,36
	Playa Hermosa	Área de Conservación Pacífico Central	36,54	11,68
Reserva Nacional Absoluta	Cabo Blanco	Área de Conservación Tempisque	16,12	11,63
Reserva Biológica	Isla del Caño	Área de Conservación Osa	52,07	9,6
En el litoral Caribe				
Parque Nacional	Tortuguero	Área de Conservación Tortuguero	526,81	23,6
	Cahuita	Área de Conservación La Amistad – Caribe	232,9	13,5
Refugio Nacional de Vida Silvestre	Gandoca-Manzanillo	Área de Conservación La Amistad – Caribe	49,84	25,48

Nota: se muestran las Áreas Marinas Protegidas de Costa Rica estudiadas, su clasificación y algunas de sus características más importantes [15].

Entrevistas

Se realizaron entrevistas de tipo estructuradas (ver Anexo 1), a través de la plataforma digital Google Forms a los 15 encargados de cada una de las AMP anteriormente descritas (cuadro 1), con el fin de profundizar sobre el monitoreo de residuos sólidos en cada una de ellas. Además, comprobar si estas Áreas poseen un Plan General de Manejo vigente y si incluyen el estudio o monitoreo de residuos sólidos.

Muestreo

Se realizó un muestreo de residuos sólidos marinos, aplicando el procedimiento de toma de muestras y clasificación descrito anteriormente, en algunas de las playas reconocidas como Áreas Marinas Protegidas. Dichas zonas se escogieron por interés de parte de los encargados por participar en el estudio, por facilidad de transporte o por disponibilidad de personal en ellas. El cuadro 2 muestra las Áreas Protegidas visitadas, las playas muestreadas, la fecha y la estación meteorológica en la que se encontraban.

Cuadro 2. Información sobre las Áreas Marinas Protegidas visitadas.

Zona	Área Marina Protegida	Playas muestreadas	Año	Fecha	Estación [16]
Caribe	Parque Nacional Cahuita	Puerto Vargas y Playa Blanca	2021	22 de octubre	Relativamente seca
	Refugio de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo	Playa Manzanillo	2021	24 de octubre	Relativamente seca
Pacífico	Reserva Natural Absoluta Cabo Blanco	Estación San Miguel y Playa Cuevas	2021	19 al 21 de octubre	Transición

Cabe mencionar que se intentó visitar el AMP conocida como Reserva Biológica Isla del Caño, sin embargo, no se obtuvo el permiso para ingresar y realizar el muestreo correspondiente. En su lugar, se realizó un muestreo adicional de residuos sólidos en Isla Violín, en la playa Caleras, cerca de la Reserva. Este se realizó el 18 de diciembre del 2021 y según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) [16], este mes se encuentra en un periodo de estación seca.

Posterior a la recolección, se separaron los residuos en las 5 categorías que el protocolo recomienda: vidrio, metal, plástico, celulósico y otros. Se contó la cantidad de piezas de cada tipo de residuo, ya que el indicador se expresa como la cantidad de piezas en 100 m. Estos residuos se pesaron utilizando una balanza manual, portátil y digital de 50kg/10gr respectivamente.

Registros

Se solicitaron registros de la cantidad de residuos sólidos en arena de las AMP que han aplicado el indicador de residuos marinos en Playas Arenosas del PRONAMEC. Se solicitaron datos a las 15 AMPs estudiadas y de las 10 encuestas recibidas, 9 de ellas no aplican el indicador o no se obtuvo respuesta ante la solicitud de los datos, y 1 AMP lo ha aplicado.

Resultados y discusión

Encuestas aplicadas

Se obtuvo respuesta de un 67% de las personas consultadas. Las AMPs que brindaron información contestando dicha encuesta fueron las siguientes: Parque Nacional Cahuita, Parque Nacional Isla del Coco, Parque Nacional Marino Las Baulas, Parque Nacional Tortuguero, Refugio Nacional de Vida Silvestre Playa Hermosa-Punta Mala, Parque Nacional Corcovado, Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo, Refugio Nacional de Vida Silvestre Ostional, Reserva Biológica Isla del Caño y Reserva Natural Absoluta Cabo Blanco.

En todas las 10 AMPs de las que se obtuvo respuesta, uno los residuos sólidos encontrados sobre la arena de la playa son envases, envoltorios y tapas plásticas, y en un 80% artículos personales como sandalias, ropa y sombreros. El 100% de los encuestados responden que la mayor fuente de contaminación es el arrastre y diferencia de corrientes marinas que depositan los residuos sólidos en la zona de la playa, y el 60% opina que es debido a desembocaduras de ríos cercanos, ambas respuestas porque reconocen ciertos residuos de determinadas zonas comerciales, porque el residuo tiene algún microorganismo marino adherido, o porque han dejado la zona limpia al recolectar los residuos después de una jornada y posteriormente encuentran otros.

Según la encuesta, 5 de los encargados respondieron que su AMP no posee un Plan General de Manejo (PGM) vigente (un 50%). En algunas de estas Áreas, se encuentra como borrador, no está aprobado, oficializado o actualizado.

Solamente 3 AMPs (de las 10 encuestas respondidas) indicaron que han aplicado el protocolo y obtenido el indicador de residuos sólidos del PRONAMEC, lo cual representa, un 30%.

De las 7 AMPs que no han aplicado el protocolo de monitoreo, el 56% indica que la razón principal de no aplicar el indicador de residuos sólidos para Playas Arenosas es por falta de personal que tome muestras, ya que no se le asigna la tarea a algún guardaparques del Área o a una persona externa, debido a que no existe presupuesto suficiente para cubrir el pago correspondiente.

Además, algunos encargados de las AMPs (el 22%) indican que hay otras actividades consideradas más importantes en el Área que monitorear los residuos sólidos, o que este no se había considerado por parte de la administración del Área.

Visitas y muestreo

El cuadro 3 muestra de forma resumida los muestreos y la cantidad de residuos sólidos en la playa por Área visitada.

Cuadro 3. Cantidad de piezas de residuos sólidos en 100 m en cada AMP visitada.

Zona	Área Marina Protegida	Playa muestreada	Muestreo	Fecha muestreo	Hora muestreo	Piezas en 100 m				
						Vidrio	Metal	Plástico	Celulósico	Otros
Caribe	Parque Nacional Cahuita	Puerto Vargas	1	22 de octubre del 2021	2:05 pm a 2:45 pm	5	1	27	0	1
		Playa Blanca	1	22 de octubre del 2021	4:05 pm a 4:20 pm	0	0	67	17	11
			2	23 de octubre del 2021	10:27 am a 11:00 am	3	0	51	0	2
	Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo	Playa Manzanillo	1	24 de octubre del 2021	10:06 am a 10:28 am	3	2	34	4	3
Pacífico	Reserva Absoluta Cabo Blanco	Playa Cuevas	1	20 de noviembre del 2021	12:10 am a 12:50 pm	0	4	78	2	4
		Playa Estación San Miguel	1	20 de noviembre del 2021	9:55 am a 11:07 am	2	0	456	12	18

Parque Nacional Cahuita

En el Parque Nacional Cahuita, en la estación de Puerto Vargas, cuando se realiza el cierre en horas de la tarde, el guardaparques encargado recoge los residuos a su vista, sin embargo, no hay registro de estos, ni es una práctica regulada o sigue algún procedimiento específico [17]. En esta zona, se encontraron residuos de vidrio, metal, plástico y otros (cuadro 3). Según la clasificación del indicador de residuos sólidos para Playas Arenosas del PRONAMEC, esta playa tiene una clasificación de limpia, considerando la percepción y cantidad de residuos encontrados.

En Playa Blanca, ocurre una situación parecida a Puerto Vargas, con la diferencia de que en ésta toman fotografías de los residuos recolectados al final de cada jornada y se envían a la dirección del SINAC, sin embargo, los guardaparques no tienen claro si esta información se registra oficialmente y si estos datos se analizan para tomar acciones al respecto [18]. También, el guardaparques Sabayo [18] indicó que hay influencia de playas cercanas donde hay gran contaminación por residuos sólidos debido a las corrientes marinas que se han creado posterior a la construcción del muelle en APM Terminals Moín, donde los residuos son arrastrados y acumulados en el parque.

En cuanto a la aplicación del protocolo PRONAMEC de Playas Arenosas, una guardaparque de Playa Blanca indicó que se requiere una autorización o una directriz de la dirección del SINAC para desarrollarlo, es decir, no tienen autoridad de hacerlo por su cuenta [19], sin embargo, el

equipo de planificación de cada Área es el responsable de diseñar, coordinar y elaborar el plan general de manejo del ASP bajo el total liderazgo de la Administración del ASP [24], donde se incluyen las AMPs.

En Playa Blanca, el ICT ha realizado un monitoreo de residuos sólidos cada 2 meses, como parte de las tareas que deben realizar para mantener el galardón del Programa de Bandera Azul Ecológica (PBAE), del cual poseen 5 estrellas. No obstante, en la fecha de este estudio (octubre 2021) se indica que hace varios meses que no lo ejecutan, debido a la pandemia por COVID-19 [19], y no hay planes actuales de retomar este muestreo, percibiéndose una falta de comunicación o interés por los resultados de dichos muestreos.

Para aplicar el protocolo en Playa Blanca, se realizaron 2 muestreos. Del primer muestreo se obtuvo una cantidad mayor de residuos sólidos, tales como plástico de varios tipos, incluyendo cuerdas de pesca; residuos celulósicos y otros; comparado con el segundo muestreo. Del segundo muestreo se esperaba mayor cantidad de residuos, ya que se tomó cerca de una desembocadura del río Suárez que se sitúa en la playa, sin embargo, la cantidad de residuos fue menor (cuadro 3). Hubo ausencia de residuos celulósicos en este segundo muestreo, una disminución del 24% en residuos plásticos y reducción del 82% en residuos clasificados como "Otros". Esto evidencia que no hay tanta influencia de esta desembocadura en la cantidad de residuos sólidos aportados.

Según la clasificación del indicador de residuos sólidos para Playas Arenosas del PRONAMEC, esta playa tiene una clasificación de limpia.

Refugio de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo

La situación es similar en el Refugio de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo. Se recogen residuos al finalizar las jornadas de trabajo, pero no se lleva ningún registro. Cabe mencionar que en esta zona no hay contenedores para separación de residuos no valorizables ni para residuos valorizables, para evitar así que los animales presentes en el lugar se alimenten de ellos, además de impedir que los visitantes dejen sus residuos en el Área [20]. Esta zona cuenta con rotulación en varios puntos que indica que cada visitante debe llevar sus propios residuos, esto se hace con el objetivo de crear conciencia. Además, no hay un buen servicio de recolección de residuos no valorizables por parte de la municipalidad correspondiente, mencionó una guardaparque del sitio [20].

El plástico fue el residuo más encontrado en Playa Manzanillo, representando el 74% de los residuos presentes, seguido de materiales celulósicos, vidrio, metal y otros. Según la clasificación del indicador de residuos sólidos para Playas Arenosas del PRONAMEC, esta playa tiene una clasificación de limpia, considerando la percepción y cantidad de residuos encontrados.

Reserva Absoluta Cabo Blanco

El AMP muestreada en la zona del Pacífico fue la Reserva Absoluta Cabo Blanco, en la cual se indica por parte de la guardaparque Cerdas [21] que los residuos sólidos que llegan a la zona son el resultado del arrastre de corrientes marinas y no debido a turistas que los visitan, ya que la cantidad de visitantes es muy baja (de 50 a 70 por día) lo que permite tener un mayor control y cuidado de la Reserva y sus recursos.

Se muestrearon dos playas de la Reserva, Playa Cuevas y la ubicada en la Estación San Miguel. En ambas el residuo encontrado en mayor cantidad fue el plástico, en cantidades muy grandes para los 100 m que fueron muestreados. También se encontró vidrio, metal y otros. Según la

clasificación del indicador de residuos sólidos para Playas Arenosas del PRONAMEC, estas dos playas podrían clasificarse como regulares, según la percepción y cantidad de residuos encontrados.

En el sector San Miguel también se localizaron gran cantidad de residuos celulósicos, sobre todo madera. En el mes de agosto del año 2021, una embarcación tipo yate chocó en este sector, dejando restos importantes del naufragio en la zona [22], por lo que la gran cantidad de residuos de madera encontrados se pueden relacionar a este suceso.

Reserva Biológica Isla del Caño

Con respecto al interés de realizar un muestreo en la Reserva Biológica Isla del Caño, se realizaron las solicitudes respectivas, pero no se logró obtener un permiso de acceso. Por lo anterior, se realizó un muestreo en Playa Caleras en Isla Violín, la cual es muy cercana a la Reserva antes mencionada. El cuadro 4 muestra la cantidad de residuos sólidos (número de piezas/100 m) para esta playa.

Cuadro 4. Cantidad de piezas de residuos sólidos en 100 m en Playa Caleras, Isla Violín.

Playa muestreada	Muestreo	Piezas en 100 m				
		Vidrio	Metal	Plástico	Celulósico	Otros
Playa Caleras	1	5	2	39	0	5

Propuesta de mejoras para el monitoreo ambiental de residuos sólidos en playas arenosas en Áreas Marinas Protegidas

Se determinó que la categorización de los residuos sólidos del protocolo es reducida y resulta deficiente para todos los tipos de residuos encontrados. Existe una nueva categorización de residuos sólidos que se propone en el PNRM 2021-2030, mostrada en la figura 1, que posee una clasificación más amplia que permite mejorar el conocimiento de los residuos que se encuentran en cada AMP.

Categoría	Descripción de elementos
Plásticos asociados a pesca	Boyas plásticas, líneas de monofilamento, líneas de multifilamento, redes plásticas, señuelos artificiales, otros
Plásticos asociados a productos de consumo	Botellas, empaques de alimentos plásticos, pajillas, utensilios de alimentos de un solo uso, cigarrillos, otros
Plásticos asociados al uso cotidiano	Bolsas plásticas, encendedores, empaques de estereofón, cajas plásticas, recipientes plásticos, juguetes plásticos, otros
Plástico particulado	Piezas plásticas, fragmentos plásticos de objetos no identificables, trozos de estereofón
Caucho	Botas, llantas, globos, balones, calzado, otros
Tela	Ropa, sábanas y otros
Papel y Cartón	Bolsas de cartón, paquetes de cigarrillos, revistas y hojas de cartón entre otros
Madera	Cajas, madera procesada (menor a 0.5 metros), otros
Metal	Botellas, aerosoles, latas de bebidas, latas de comida
Vidrio	Bombillos, botellas, otros
Cerámica	Macetas, utensilios de cocina, losas de piso o fachadas y tejas
Implementos sanitarios y médicos	Condones, pañales, aplicadores, tampones, toallas femeninas, jeringas y artículos médicos entre otros
Otros	Tetrapak, juguetes, partes de aparatos eléctricos y electrodomésticos, baterías, otros

Fuente: Elaboración del equipo técnico, Karol Ulate, 2021

Figura 1. Propuesta de clasificación según categorías para residuos sólidos de origen antropogénico [4].

Además, es importante que exista una estandarización de la categorización de residuos sólidos en todos los PRONAMEC al igual que las unidades métricas contempladas en la evaluación del indicador [4], ya que resultaría beneficioso contar con datos de este en las demás categorías para cuantificar el estado de los residuos sólidos en los diversos ecosistemas presentes en el país, los cuales podrían ser comparados a su vez entre sí [4].

El protocolo PRONAMEC para Playas Arenosas indica que se debe tomar una muestra en el límite del Área Protegida, otra fuera del Área y otra dentro. Podría ser de gran utilidad, para obtener mayor cantidad de datos y que las muestras sean aún más representativas, delimitar transectos de muestreo con medidas de 50 m o 100 m entre cada punto de muestreo.

Por otro lado, según el PNRM, es importante tener una estrategia unificada para la recopilación de información de los residuos sólidos, por tipo de residuo, con el fin de que puedan compararse entre AMPs y que sirva para toma de decisiones a nivel nacional, por lo que se debe elaborar, implementar y mantener una aplicación electrónica que facilite la incorporación de la información recopilada y que permita monitorear los resultados [4].

Además, es importante tener una plataforma tecnológica que permita el acceso a los estudios realizados, que puedan ser utilizados para el desarrollo de estudios científicos y académicos, y para la toma de decisiones a nivel nacional en el tema de residuos marinos [4], como lo es la plataforma nacional llamada Sistema Nacional de Información Ambiental de Costa Rica (SINIA) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), que ha sido oficializada para el almacenamiento de datos de residuos marinos (Decreto N° 37658) [23].

Las AMPs deberían elaborar un informe por año, incluyendo las mediciones del indicador de residuos sólidos de cada 3 meses, según lo indica el protocolo, con el fin de evaluar el proceso y los resultados obtenidos, y poder así proponer y realizar mejoras.

Por último, durante las visitas a las diferentes Áreas, algunas de estas tenían un fuerte interés por educar al visitante. La rotulación educativa sobre residuos sólidos puede ser de gran ayuda para disminuir la cantidad de estos, creando conciencia en el turista y logrando con esto una playa que se clasifique y mantenga como una playa limpia.

Conclusiones

La contaminación por residuos sólidos es evidente en las costas, incluso en las zonas que han sido declaradas Áreas Protegidas. Muchas de estas, a pesar de los esfuerzos, siguen recibiendo residuos que llegan de fuentes terrestres, otras que abandonan los turistas, producto de las actividades comerciales de la zona y por arrastre de corrientes marinas.

Las playas muestreadas en el Pacífico presentan mayor cantidad de residuos sólidos que las muestreadas en el Caribe, sin embargo, es importante aplicar el indicador en más AMPs para poder realizar comparaciones robustas a lo largo del país y poseer parámetros cotejables en el tiempo. En las Áreas muestreadas del Caribe la clasificación es de limpia, mientras que en las Áreas muestreadas del Pacífico es de regular.

En algunas Áreas Protegidas no se encuentra el Plan General de Manejo actualizado, los cuales son indispensables porque permiten definir una ruta metodológica de los indicadores a aplicar, incluyendo el de residuos sólidos. La desactualización o la falta de monitoreo en algunas ASP evidencia barreras para la aplicación de los indicadores a monitorear.

Una de las mayores barreras para la aplicación del monitoreo de residuos sólidos en las diferentes AMPs es la falta de personal interno o externo que tome muestras, ya que existe una falta de presupuesto para realizar el pago correspondiente a estas personas.

Otra barrera identificada para monitorear los residuos sólidos en las playas de las AMPs es que no se considera el monitoreo de residuos como una de las actividades importantes en el Área, mostrando una falta de comunicación efectiva que logre una toma de decisiones consensuadas entre todos los funcionarios y funcionarias del ASP.

El indicador de residuos sólidos para Playas Arenosas del PRONAMEC es de fácil aplicación, el tiempo requerido es corto y los recursos necesarios para obtenerlo son baratos. La planificación es relativamente sencilla y es indispensable encargar a una o algunas personas para el monitoreo cada 3 meses, obteniendo datos tanto de la época seca como de la lluviosa. Solamente 1 Área Marina Protegida (Refugio Nacional de Vida Silvestre Playa Hermosa-Punta Mala) de las 15 con porción de playa y mar, ha aplicado con certeza el indicador de residuos sólidos del PRONAMEC para Playas Arenosas.

Se identificaron deficiencias en el indicador de residuos sólidos estudiado en cuanto a la categorización de los residuos sólidos y a la cantidad de los puntos de toma de muestra ya que no resulta tan representativa respecto al tamaño de las playas.

Recomendaciones

Aplicar un monitoreo de residuos sólidos en las playas en las que no se ha realizado, tanto en la época seca como en la lluviosa, como lo recomienda el indicador de residuos sólidos para Playas Arenosas del PRONAMEC, para conocer la fuente los residuos sólidos que llegan a las AMPs y su tendencia a variar.

Priorizar acciones como el monitoreo de residuos sólidos en la playa en el Plan General de Manejo en cada Área, mantenerlo vigente y actualizado.

Presentar un informe anual al equipo de planificación del PGM y los actores sociales clave relacionados con la gestión del ASP y poder así proponer acciones para la mejora en el uso del indicador de residuos sólidos y en la situación de la zona monitoreada.

Realizar talleres o capacitaciones, dirigidos por los encargados de PRONAMEC del SINAC, sobre la importancia del monitoreo de residuos en todas las ASP, para un refrescamiento de la aplicación de protocolos y de la forma correcta de tomar las muestras y e ingresar la información en bases de datos en Excel o algún programa similar.

Aprovechar el apoyo de los voluntarios en las campañas de limpieza de algunas Áreas de Conservación para la aplicación del indicador de residuos sólidos, esto ante la falta de presupuesto que existe para pagar a una persona externa que realice los muestreos, o buscar incluir la toma de muestras en las actividades de las asociaciones con las cuales existen alianzas público-privadas.

Reportar los datos obtenidos durante los 4 muestreos del año a un único custodio en SINAC, con el fin de evaluar el proceso y los resultados de forma integral en todo el país.

Promover una mayor interacción entre el SINAC y el SINIA, para el ingreso de datos de forma periódica.

Mejorar la categorización de residuos sólidos para tener mayor conocimiento de cuáles se encuentran en las AMPs. Aplicar el indicador en otros protocolos PRONAMEC para obtener datos en los diversos ecosistemas y poder ser comparados entre sí. Estandarizar las unidades métricas contempladas en la evaluación del indicador y mejorar la cantidad de puntos de muestreo con el fin de que sea más representativa respecto al tamaño de la playa.

Fomentar la educación ambiental hacia los visitantes mediante rotulación con mensajes de concientización. Esto puede ser de gran ayuda para mantener el indicador de residuos sólidos en una categoría de playa limpia.

Considerar el cambio del término “basura” por el término correcto “residuos” en el nombre del indicador “Basura en la Playa” del protocolo para Playas Arenosas del PRONAMEC, y en “Basura Inorgánica” del indicador del PBAE de la Categoría Comunidades Costeras. Lo anterior por cuanto en la Ley para la Gestión Integral de Residuos, define la palabra residuos como vocablo a utilizar en Costa Rica.

Agradecimientos

Al Sistema Nacional de Áreas de Conservación en el Parque Nacional Cahuita, en el Refugio de Vida Gandoca-Manzanillo y en la Reserva Absoluta Cabo Blanco, por el recibimiento y estadía en las Áreas Marinas Protegidas y por el apoyo en esta investigación.

Al profesor Ricardo Ulate del Tecnológico de Costa Rica en la sede de Limón y a Henry Mora Delgado, por la ayuda en los muestreos de residuos.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente & Energía (MINAE), PNUD, MARVIVA, CRUSA, Ministerio de Salud (MS), y Cámara Nacional de Comerciantes Detallistas y Afines. Estrategia Nacional para la sustitución de plásticos de un solo uso. 1 ed. (2017). Consultado: Set., 05, 2021. [Online]. Disponible en: https://fundacionmadreverde.org/wp-content/uploads/2020/11/5a0e066d79dae_Estrategia-nacional-sustitucion-plasticos-un-solo-uso-1.pdf
- [2] Asamblea Legislativa. (2019, oct. 27). Versión 5, Artículo 58: Ley de Biodiversidad, N°7788. Sistema Costarricense de Información Jurídica, Costa Rica. [Online]. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1NRTC&nValor1=1&nValor2=39796&nValor3=119205&strTipM=TC
- [3] V. García, J. Acuña, J. Vargas, y J. García, “Calidad bacteriológica y desechos sólidos en cinco ambientes costeros de Costa Rica”, Rev. Biol. Trop., vol 54, pp. 35-48, Set., 2006. [Online]. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/26828/26997>
- [4] Ministerio de Salud. Plan Nacional de residuos marinos 2021-2030. 1 ed. (2021). Consultado: Dic. 20, 2021. [Online]. Disponible en https://www.ministeriodesalud.go.cr/sobre_ministerio/prensa/comunicados/plan_nacional_residuos_marinos_2021_2030.pdf
- [5] M.A. Porras, “Caracterización de micro y mesoplásticos y su asociación con biopelículas en el Humedal Gualí (Funza. Cundinamarca)”, grado de Microbiología Industrial, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia, 2021. [Online]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/58262/TESIS%20REVISADA.%20ALEJANDRA%20PORRAS%20R.pdf?sequence=2>
- [6] M.A. Pérez, “Determinación de micro plásticos en especies marinas del Parque Nacional Marino Las Baulas”, grado de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Ambiental, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2020. [Online]. Disponible en: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12255/TFG_Angelica_Astorga_P%C3%A9rez.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [7] Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA). “El 68 % de todas las partículas encontradas en Jacó son estereofón”. Cica.ucr.ac.cr. <http://cica.ucr.ac.cr/?p=6694> (consultado el 12 de Nov., 2021).
- [8] Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto. “Costa Rica es seleccionada como país beneficiario bajo la categoría líder del proyecto de cooperación Asociaciones GloLitter de la Organización Marítima Internacional (OMI)”. Rree.go.cr. <https://www.rree.go.cr/?sec=servicios&cat=prensa&cont=593&id=5958> (consultado el 12 de Nov. 2021).
- [9] M.J. Brenes. “Costa Rica amplía su área de protección marina para saldar deuda histórica”. Efeverde.com. <https://www.efeverde.com/noticias/costa-rica-areaproteccion-marina/> (consultado el 30 de Oct., 2021).
- [10] SWI. “Costa Rica amplía de un 2,7 % a un 30 % las áreas marinas de protección”. Swissinfo.ch. https://www.swissinfo.ch/spa/costa-rica-oc%C3%A9anos_costa-rica-ampl%C3%ADa-de-un-2-7---a-un-30---las-%C3%A1reas-marinas-de-protecci%C3%B3n/47202502 (consultado el 2 de Set., 2023).

- [11] B. Finegan, S.E. Sesnie, P.E. Gessler, y S. Thessler, "Integrating Landsat TM and SRTM-DEM derived variables with decision trees for habitat classification and change detection in complex neotropical environments", *RSE. ELSEVIER*, vol 112, pp. 2145-2159, May., 2008, doi: [10.1016/j.rse.2007.08.025](https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.025)
- [12] Sistema Nacional Áreas de Conservación (SINAC). "Glosario". SINAC.go.cr. <http://www.sinac.go.cr/ES/Paginas/Glosario.aspx> (consultado el 30 de Nov., 2021).
- [13] Poder Ejecutivo. (2016, jul. 08). *Versión 1, Decreto N° 39.747: Reglamento de Creación y Funcionamiento del Programa Nacional de Monitoreo Ecológico (PRONAMEC)*. [Online]. Disponible en: https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=81891&nValor3=104627&strTipM=TC
- [14] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). Protocolo PRONAMEC: Protocolo para el monitoreo ecológico de las playas arenosas: Proyecto Consolidación de las Áreas Marinas Protegidas. 1 ed. (2016). Consultado: Set. 05, 2021. [Online]. Disponible en <https://www.sinac.go.cr/ES/docu/ASP/Protocolo-PRONAMEC-PlayaArenosas.pdf>
- [15] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). GRUAS II: Propuesta de Ordenamiento Territorial para la conservación de la biodiversidad de Costa Rica, vol 3: Análisis de Vacíos en la Representatividad e Integridad de la biodiversidad marina y costera. 1 ed. (2008). Consultado: Feb. 20, 2021. [Online]. Disponible en https://www.acto.go.cr/wp-content/uploads/2020/04/GRUAS_II_VOL_II.pdf
- [16] Instituto Meteorológico Nacional (IMN). "Clima en Costa Rica y Variabilidad Climática". imn.ac.cr. <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica> (consultado el 30 de Oct., 2021).
- [17] J. Fallas, comunicación personal, Oct., 2021.
- [18] A. Sabayo, comunicación personal, Oct., 2021.
- [19] M. Cortés, comunicación personal, Oct., 2021.
- [20] F. Cruz, comunicación personal, Oct., 2021.
- [21] M. Cerdas, comunicación personal, Nov., 2021.
- [22] CRHoy. "Yate estadounidense se hunde tras chocar en Cabo Blanco". Crhoy.com. <https://www.crhoy.com/nacionales/fotos-yate-estadounidense-se-hunde-tras-chocar-en-caboblanco/> (consultado el 30 de Oct., 2021).
- [23] Poder Ejecutivo. (2013, may. 16). *Versión 1, Decreto N° 37658: Establecimiento del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) y Reforma del Artículo 3° del Decreto Ejecutivo N° 29540-MINAE del 11 de mayo del 2001*. [Online]. Disponible en: https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=74843&nValor3=92549&strTipM=TC
- [24] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). Guía para el diseño y formulación del Plan General de Manejo de las Áreas Silvestres Protegidas de Costa Rica. 1ed. (2013). Consultado: Feb. 20., 2021. [Online]. Disponible en <https://biocorredores.org/corredoresbiologicos/sites/default/files/docs/SINAC%20Guia%20PM%202014.pdf>

Anexos

Encuesta aplicada a los representantes de las AMP

El presente documento es un primer acercamiento a los encargados o representantes de las Áreas Marinas Protegidas de Costa Rica, como parte del Trabajo Final de Graduación de Sofía Fallas Flores, estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Costa Rica, sede central. El objetivo de esta herramienta es conocer de forma general la situación actual de estas áreas y las barreras que existen al realizar un monitoreo de residuos sólidos, esto con el fin de generar mejoras para un adecuado monitoreo en estas zonas de protección que son de gran importancia ambiental y cultural para el país.

Agradezco cualquier consulta, comentario o recomendación a través del correo: sofiafallas4@gmail.com.

1. ¿De cuál Área Marina Protegida es usted representante?
2. ¿Qué tipo de actividades están permitidas en esta Área Marina Protegida?

- Turismo terrestre (caminatas, uso de la playa, cabalgatas, entre otros)
 - Turismo acuático (snorkel, nado, kayak, avistamiento de cetáceos, entre otros)
 - Actividades académicas (visita de grupos escolares y/o universitarios, entre otros)
 - Investigaciones científicas
 - Otra ¿cuál?
3. ¿El Área Marina Protegida cuenta con contenedores de residuos que permitan la separación por residuo para el posterior reciclaje?
- Sí
 - No
4. Si su respuesta fue Sí, por favor indicar cuántos contenedores de residuos cuenta el área según el tipo:

	1	2	3	4	5 o más
Vidrio					
Plástico					
Aluminio					
Papel y cartón					
Orgánico					
Residuos no valorizables (basureros convencionales)					

5. ¿Cuáles son los residuos sólidos más frecuentemente encontrados o vistos en la zona de la arena de la playa?
- Envases plásticos
 - Envases de vidrio
 - Envases de aluminio
 - Colillas de cigarro
 - Envoltorios plásticos
 - Envoltorios de papel
 - Tapas plásticas
 - Artículos personales como sandalias, ropa, sombreros, entre otros
 - Artes de pesca como cuerdas y redes, boyas, anzuelos, entre otros
 - Otro ¿cuál?
6. ¿Cuáles considera usted que podrían ser las mayores fuentes de contaminación de esos residuos marinos en esta Área Marina Protegida?
- Población humana cercana
 - Residuos mal gestionados producto del turismo
 - Desembocadura de ríos
 - Por arrastre y diferencia de corrientes marinas que depositan los residuos sólidos en la zona de la playa
 - Otra ¿cuál?

7. ¿El Área Marina Protegida cuenta con un Plan General de Manejo vigente?
 - Sí
 - No
8. Indicar el periodo de vigencia de plan de manejo vigente o del último plan vigente.
9. ¿Cuáles elementos focales están priorizados en este plan general de manejo?
10. ¿Cuáles Protocolos de Monitoreo Ecológico (PRONAMEC) se aplican en esta área?
 - Protocolo PRONAMEC Playas Rocosas
 - Protocolo PRONAMEC Playas Arenosas
 - Protocolo PRONAMEC Agregaciones de Mamíferos Acuáticos
 - Protocolo PRONAMEC Playas Anidación de Tortugas Marinas
 - Protocolo PRONAMEC Dinámica de Playas Arenosas ante Cambio Climático
 - Protocolo PRONAMEC Formaciones Coralinas
 - Ninguno

11. El PRONAMEC de Playas Arenosas posee un indicador de residuos sólidos. Si el Área Marina Protegida ha aplicado este monitoreo, basado en estos resultados, por favor marque los años en los que se ha aplicado:

Año	Época seca	Época lluviosa
2006		
2007		
2008		
2009		
2010		
2011		
2012		
2013		
2014		
2015		
2016		
2017		
2018		
2019		
2020		
2021		

Si su respuesta posee más de un período, indique si el indicador de residuos sólidos ha mejorado:

- Sí
- No
- Aún no se han analizado los datos

12. ¿Se aplica alguna otra metodología de monitoreo de residuos en el Área Marina Protegida?
- Sí ¿cuál?
 - No
13. Si su respuesta fue Sí, ¿cuál metodología de monitoreo se aplica?
14. Si realizan monitoreo de residuos ¿La base de datos o resultados obtenidos se encuentra abierta al público y/o es reportada a alguna entidad?
- Abierta al público
 - Reportada a alguna entidad (es)
 - No es abierta ni se reporta
15. Si no realizan un monitoreo de residuos sólidos en el área ¿Cuál es la razón?
- Falta de presupuesto
 - Falta de personal que tome muestras de los residuos sólidos
 - No hay necesidad de reportar la cantidad de residuos sólidos a ninguna entidad (es)
 - Hay otras actividades consideradas más importantes en el Área Marina Protegida antes que el monitoreo de residuos sólidos
 - Otra ¿cuál?

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Efectos del cromo en el consumo de oxígeno y excreción de amonio en tilapia (*Oreochromis niloticus*) de agua dulce

Effects of chromium on oxygen consumption and ammonium excretion in freshwater tilapia (*Oreochromis niloticus*)

Bessie Evelyn Oliva-Hernández¹, Edison Barbieri², Juan Francisco Pérez-Sabino³, Roel Campos-Rodríguez⁴

Fecha de recepción: 6 de septiembre, 2023

Fecha de aprobación: 25 de enero, 2024

Oliva-Hernández, B. E; Barbieri, E; Pérez-Sabino, J. F; Campos-Rodríguez, R. Efectos del cromo en el consumo de oxígeno y excreción de amonio en tilapia (*Oreochromis niloticus*) de agua dulce. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 48-60.

<https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6883>

1 Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo -DOCINADE.

bessieoliva@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0002-4427-5888>

2 Instituto de Pesca, Universidad de São Paulo (USP). Brasil.

edisonbarbieri@yahoo.com.br

<https://orcid.org/0000-0002-7423-3726>

3 Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

fpsabino@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0001-5736-0371>

4 Escuela de Agronegocios, DOCINADE, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

rocampos@tec.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>



Palabras clave

Cromo; tilapia; biomarcadores; consumo de oxígeno; excreción de amonio; agua dulce.

Resumen

La contaminación por cromo (VI) en cuerpos de agua ha ocurrido por la descarga de aguas residuales industriales, que pueden provenir de industria de curtiembre, minera, o galvanoplastía causando serios problemas a la fauna acuática, principalmente en peces, los cuales pueden sufrir alteraciones histopatológicas en branquias, riñones e intestinos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de cromo (0.0 (control), 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 y 30.0 mg/L) en el consumo de oxígeno y excreción de amonio en tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) de agua dulce, ya que esta especie tiene un interés alimenticio y económico en diferentes comunidades del país. Este estudio se realizó utilizando 42 peces juveniles de tilapia de un peso entre 1.0 y 3.0 gramos, los cuales fueron colocados en seis peceras con diferentes concentraciones de cromo. Después de 4 horas de exposición, se trasladaron a un sistema con recirculación de agua y en respirómetros individuales. Para cada concentración se utilizó un grupo de 7 peces, a los que se determinó el consumo de oxígeno y la excreción de amoníaco en cada respirómetro. Los resultados mostraron que al aumentar la concentración de cromo en el agua ($p < 0.05$), disminuyó el consumo de oxígeno hasta un 62.8% de 0.4168 mL/g/L en el grupo control a 0.1550 mL/g/h en la concentración de 30.0 mg/L de cromo. La excreción de amonio fue mayor ($p < 0.05$), después de haber sido expuestos los peces a una concentración de 1 mg/L de Cr^{6+} .

Keywords

Chromium; tilapia; biomarkers; oxygen consumption; ammonium excretion; freshwater.

Abstract

Chromium VI contamination in bodies of water has occurred due to the discharge of industrial wastewater, which may come from the tanning, mining, or electroplating industry, causing serious problems for aquatic fauna, mainly fish, which may suffer histopathological alterations in gills, kidneys and intestines. This study aimed to evaluate the effect of different chromium concentrations (0.0 (control), 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 and 30.0 mg/L) on oxygen consumption and ammonium excretion in freshwater tilapia (*Oreochromis niloticus*), since this species has a nutritional and economic interest in different communities of the country. This study was carried out using 42 juvenile tilapia fish weighing between 1 and 3 grams, which were placed in six tanks with different chromium concentrations. After 4 hours of exposure, they were transferred to a system with recirculating water and individual respirometers. For each concentration, a battery of 7 fish was used, to which the oxygen consumption and ammonia excretion of each respirometer were determined. The results showed that by increasing the concentration of chromium in the water ($p < 0.05$), oxygen consumption decreased up to 62.8% from 0.4168 mL/g/L in the control group to 0.1550 mL/g/h in the concentration of 30.0 mg/L of chromium (VI). The ammonium excretion showed the highest concentration ($p < 0.05$), after the fish were exposed to having been exposed to a concentration of 1 mg/L of Cr^{6+} .

Introducción

En la actualidad, la contaminación del agua representa una grave amenaza ambiental, lo que provoca un impacto en la fauna, la flora y en la salud humana [1]. Los metales pesados son potencialmente tóxicos y se distribuyen a través de diferentes vías [2], ingresando a los organismos acuáticos al llegar a los cuerpos de agua provenientes de la erosión del suelo, escorrentías urbanas, así como de desechos de curtidurías, productos farmacéuticos, de teñido, de minería, cerámica, galvanoplastia de acabado de metales, así como de la descarga de aguas residuales, industrias textiles y de impresión y muchas otras [3], debido a la mala gestión en la eliminación de desechos. Estas actividades han contribuido a aumentar la contaminación ambiental por metales traza tóxicos [4].

Los metales traza son elementos que normalmente se encuentran en niveles muy bajos en el medio ambiente [5]. En los ecosistemas, algunos tienen funciones esenciales para la supervivencia de los organismos acuáticos [5] [6], pero en altas concentraciones pueden inducir cambios genéticos, bioquímicos y fisiológicos en las especies de estos ecosistemas comprometiendo su adaptabilidad y supervivencia [7].

El cromo es un metal muy estable, que se presenta en diferentes formas en la naturaleza, como formas divalentes (Cr(II)), trivalentes (Cr(III)), y hexavalentes (Cr(VI)) [8], encontrándose en el agua en estado de oxidación Cr(III) o Cr(VI). El Cr(VI) es la forma más tóxica y presenta severos impactos en los ecosistemas acuáticos [9], es carcinogénico para los animales y humanos [8] [10], pudiendo causar daño en branquias, hígado y riñones provocando estrés oxidativo, daño en el ADN y efectos hepatotóxicos y nefrotóxicos en los peces [12] debido a que el cromo puede difundirse fácilmente a través de las branquias para concentrarse en varios tejidos y provocar una acción tóxica Wepener et al [13]. La contaminación por cromo de fuentes industriales puede afectar la vida acuática, el ecosistema y la salud humana, directamente o a través de la cadena alimentaria. Yilmaz *et al* [10] realizó un estudio con tilapia (*Oreochromis aureus*) expuesta a cromo hexavalente en cinco concentraciones diferentes (10, 15, 20, 25 y 30 mg/L). Estas concentraciones son consideradas subletales para los juveniles de tilapia representativas de la exposición ambiental, reportando que el cromo se concentró mayormente en branquias, piel y en tejidos musculares en menor cantidad, y que los peces perdieron progresivamente su capacidad de responder a este aumento durante el periodo de la exposición.

Por otra parte, se considera a los peces como excelentes bioindicadores, y son ampliamente utilizados para describir características naturales de sistemas acuáticos y para evaluar alteraciones en el ambiente [4] [14] [15] [16]. En un estudio realizado por Oliveira *et al en 2012* [17] evaluaron los efectos metabólicos causados por el uso de nanopartículas de óxido de cobre utilizando la técnica de respirometría cerrada y la excreción de amoníaco como biomarcador del metabolismo (efectos fisiológicos) sobre *Danio rerio* (pez cebra). En el estudio, los peces se expusieron a concentraciones de 0, 50, 100 y 200 µg/L de nanopartículas de óxido de cobre, presentando una disminución en la excreción específica de amoníaco en un 34 % y un 83 % cuando los peces se exponen a concentraciones de 100 y 200 µg/L, respectivamente, por 24 horas en comparación con el control.

En otro estudio realizado en 2022 [18] sobre la exposición de peces *Danio rerio* (pez cebra) a nanopartículas de plata, se encontró que las nanopartículas de plata (AgNP) microsintetizadas provocaron un aumento significativo ($p < 0.05$) del consumo de oxígeno a la concentración más alta estudiada (75 µg/L) y un aumento en la excreción de amoníaco a las concentraciones más bajas, seguido de una reducción a las concentraciones más altas. Los autores encontraron hallazgos similares a estudios realizados con AgNO₃ en los que aumentó el consumo de

oxígeno a bajas concentraciones de exposición, seguido de una disminución en las altas concentraciones probadas, y al mismo tiempo perjudicó la excreción de amoníaco en todas las concentraciones probadas lo que indica que la exposición indujo a cambios fisiológicos.

En un estudio realizado en Lambari *Deuterodon iguape* (Eigenmann 1907) que es una especie nativa de Brasil, Barbosa *et al.* En 2021 [15] expusieron los peces a una concentración de 0.1 µg/L de propiconazol, observándose una reducción en la excreción de amoníaco del 68.7 % con una diferencia significativa ($p < 0.05$) con relación al control. Para el consumo específico de oxígeno, se presentó una diferencia estadísticamente significativa aumentando su consumo a una concentración de 0.01 µg/L y luego disminuyendo a medida que aumenta la concentración de propiconazol.

La tilapia del Nilo (*O. niloticus*) (Linnaeus, 1758) [19], es producida comúnmente para el consumo humano en todo el mundo [20], siendo el cultivo de tilapia el segundo más importante dentro del cultivo de peces [21]. China es el mayor productor de tilapia del Nilo cultivada con una producción de 806 000 toneladas en 2003. Las especies de *Oreochromis* son peces comúnmente utilizados en estudios de ecotoxicología, ya que se reproducen fácilmente, son resistentes a enfermedades y no presentan problemas graves de alimentación [22].

La tilapia del Nilo (*O. niloticus*) es una especie altamente consumida en Guatemala y en otros países. Esta se puede utilizar como un excelente indicador para evaluar la calidad del agua y la contaminación por metales pesados en ambientes acuáticos [18]. La importancia del estudio de cromo en tilapia es porque el cromo hexavalente se bioacumula y la ingesta de pescado contaminado pone en riesgo de contraer cáncer a las personas que lo consumen [23]. Ghosh y Saha [24] determinaron la concentración letal LC50 de cromo hexavalente en tilapia del Nilo (*O. niloticus*) reportando valores de LC50 a 121.06, 108.30, 99.31 y 93.49 mg/L de cromo hexavalente para exposiciones por 24, 48, 72 y 96 horas respectivamente, concluyendo que con el aumento de la concentración del metal, la respuesta de la mortalidad de los peces aumentó gradualmente y que es directamente proporcional a la concentración de cromo hexavalente.

El metabolismo es un proceso fisiológico, que refleja el gasto energético que tienen los organismos vivos, que en animales heterótrofos se mide por las exigencias alimentarias [25]. La tasa metabólica que en los peces se refiere generalmente a la tasa de respiración, se mide como la tasa de consumo de oxígeno [26] [27], y en un entorno de laboratorio, el consumo de oxígeno se mide en un respirómetro, como la pendiente de la disminución del contenido de oxígeno en el agua a lo largo del tiempo [28]. Durante la excreción los peces generan productos de desecho que consisten en dióxido de carbono y amoníaco, los cuales se expulsan a través de las branquias por difusión [29] [30]. Estas herramientas fisiológicas son valiosas y se utilizan para realizar predicciones de cómo responden las poblaciones de peces cuando se enfrentan a condiciones nuevas [25] [31] [32] [33] ayudando a entender el metabolismo de rutina y la condición física de los peces [28].

La tilapia del Nilo es un pez teleósteo, de la familia Cichlidae, amoniotélico para el cual gran parte del amoníaco producido proviene del grupo de aminoácidos α -amino que se catabolizan, al que afectan los factores del medio ambiente y los factores bióticos en la excreción de nitrógeno amoniacal, el cual es el mayor producto final del catabolismo representado entre el 70 y 95% del nitrógeno total que excretan a través del epitelio branquial [29] Kaushik [34].

Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue investigar si se afecta el metabolismo de la tilapia del Nilo (*O. niloticus*) por exposición a diferentes concentraciones de cromo hexavalente en el agua, evaluando dos biomarcadores fisiológicos, el consumo de oxígeno y la excreción de amoníaco, al ser la tilapia una especie que se encuentra y se cultiva para el consumo, en cuerpos de agua en Guatemala, que reciben aguas residuales de industria de curtiembre y otros orígenes.

Metodología

El efecto del cromo sobre el consumo de oxígeno y excreción de amonio en tilapia (*Oreochromis niloticus*) se evaluó mediante la exposición de peces juveniles en agua con diferentes concentraciones de cromo hexavalente, por un periodo de cuatro horas. Luego, los peces se colocaron por una hora en respirómetros de 500 mL (frascos de vidrio) con flujo continuo de agua en el interior de peceras. Posteriormente, con el pez en su interior, se tapó cada respirómetro y se midieron las concentraciones de oxígeno y amonio, antes de taparse y una hora después de taparse el respirómetro, para evaluar el oxígeno consumido y el amoníaco excretado por el pez luego de haberse expuesto al agua contaminada con cromo.

Exposición de peces a cromo VI

La exposición a cromo de los peces se realizó de manera según [35] y [36]. Un total de 42 peces juveniles cultivados de 1.00 a 3.00 g fueron utilizados para el experimento, los cuales previo al mismo, se dejaron de alimentar por un periodo de 24 horas. Se colocaron grupos de 7 peces en peceras de 5.00 L que contenían diferentes concentraciones de cromo ($K_2Cr_2O_7$). Los peces de cada grupo fueron expuestos separadamente a una de las siguientes concentraciones de cromo: 0.0 (control), 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 y 30.0 mg/L, por un periodo de 4 horas. La temperatura del agua dentro de las peceras se mantuvo a 22 °C.

Determinación de oxígeno

La determinación de oxígeno fue realizada según [37]. Después de corrido el experimento, los peces se colocaron en respirómetros individualmente, los cuales se colocaron en un tanque de 30 L con circulación continua de agua. Se trasladó y mantuvo cada pez de cada grupo en el respirómetro sin tapar, con circulación continua de agua por 60 minutos, para atenuar el estrés del manejo. A continuación, se suspendió la circulación de agua y el respirómetro se cerró, para que el pez consumiera el oxígeno presente en el agua por un periodo de una hora. Los respirómetros fueron protegidos al colocarlos en un tanque opaco para aislar a los peces del posible movimiento en el laboratorio y no afectarlos por estrés.

La diferencia entre las concentraciones de oxígeno determinadas al inicio y al final del confinamiento se utilizó para calcular el consumo de este durante el periodo en que permanece en el respirómetro cerrado, luego de la exposición al agua contaminada con cromo (VI). El oxígeno disuelto se determinó utilizando el método de Winkler modificado. Se tomaron las muestras de agua en botellas para DBO de 60 mL de color ámbar. Se hace un sifón con una manguera de hule, se colocó un extremo en el respirómetro que tiene el pez y el otro extremo de la manguera en el fondo de la botella para DBO; para no generar turbulencia y entrada de oxígeno, se debe escurrir lentamente. Antes de tomar la muestra se dejó correr unos 2 mL de agua para asegurar que la muestra de agua fuera del respirómetro. La botella se lava 2 veces con el agua de la muestra, luego se tapa sin dejar burbujas. Todos los reactivos utilizados son grado reactivo. Después se agregaron 0.500 mL de una disolución de cloruro de manganeso (II) ($MnSO_4 \cdot H_2O$) 2M, 0.500 mL de yoduro alcalino (KI 3.6 M y KOH 5.4 M preparado con 60 g de KI y 30 g de KOH, disueltos separadamente en la menor cantidad de agua, y luego mezclados y diluidos a 100 mL) y se tapó sin dejar burbujas de aire. Se agitó el frasco y se dejó reposar por 30 minutos. Pasado este tiempo, se agregó 1 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) (preparado 1:1 en agua destilada) y se agitó. Luego en un matraz erlenmeyer de 150 mL se tomaron 40 mL de muestra y se titularon con tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_3$) 0.02 N M hasta una coloración amarillo pajizo. Posteriormente se agregó 1 mL de disolución de almidón (1 g/100 mL) y se tituló hasta la desaparición del color azul. El volumen de la titulación sirvió para determinar el oxígeno presente y el consumo de oxígeno en mL/L restando el oxígeno inicial menos el presente en la muestra final. Finalmente se calcula el consumo específico en mL/L/g/h.

Determinación de nitrógeno de amonio

La excreción de amonio se determinó según [38] [39]. Las muestras para la determinación de nitrógeno de amonio se colectaron después de haber tomado las muestras de oxígeno en cada respirómetro, por medio de un sifón directamente hacia el frasco de muestreo. Se midieron 25 mL de muestra en un Erlenmeyer y se adicionó 1 mL de reactivo de Nessler; después de 10 minutos se hizo la lectura en un espectrofotómetro a 410 nm. El reactivo de Nessler se preparó disolviendo 25 g yoduro de mercurio (HgI_2) y 20 g de yoduro de potasio (KI) en 500 mL de agua destilada libre de amonio; a esta disolución se le agrega una disolución preparada con 100 g de hidróxido de sodio (NaOH) en 500 mL de agua destilada libre de amonio. Esta disolución puede conservarse en un frasco de vidrio en refrigeración, por un año. El cálculo de resultados se hizo a partir de una curva patrón de nitrógeno de amonio, que se prepara a partir de la disolución de 3.819 g de cloruro de amonio (NH_4Cl) en 1000 mL de agua destilada (1 mL = 1.0 mg N) para la disolución madre. A partir de esta se prepara la curva patrón con concentraciones de 0.10; 0.20; 0.30; 0.40; 0.50; 0.60; 0.70; 0.80 y 0.90 mg/L tomando de 1.00 a 9.00 mL de la disolución madre y diluyendo a 100 mL cada una de las disoluciones.

Análisis estadístico

Las medias de consumo específico de oxígeno y excreción de amoníaco de los peces se sometieron a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, con un 95 % de confiabilidad, y a la prueba de homocedasticidad de Levene. Posteriormente, se aplicó la prueba de ANOVA para comparar los tratamientos y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0.05$).

Resultados y duscusión

Tasa metabólica (consumo de oxígeno)

Se midió el consumo específico de oxígeno de juveniles de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) que fueron aclimatados en peceras a una temperatura de 22 °C para 5 diferentes concentraciones de cromo (VI). Los valores obtenidos representan una disminución en el consumo de oxígeno de 6.62, 6.41, 40.60, 40.14 y 62.81 % de la medición del grupo control. El cuadro 1 muestra la determinación del consumo de oxígeno en mL/g/h de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) expuesta a concentraciones de cromo (VI) de 0.0 (control), 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 y 30.0 mg/L, en respirómetros a una temperatura de 22 °C por un tiempo de 4 horas.

Cuadro 1. Media del consumo de oxígeno específico ($mLO_2/g/L$) de los grupos en 4 horas de exposición a diferentes concentraciones de Cr^{6+} ($n = 7$, para cada concentración)

Parámetro	Control	1.0 mg/L	5.0 mg/L	10.0 mg/L	15.0 mg/L	30.0 mg/L
Media	0.4168	0.3892	0.3901	0.2476	0.2495	0.1550
Dest	0.0543	0.0726	0.0419	0.0462	0.0769	0.0435

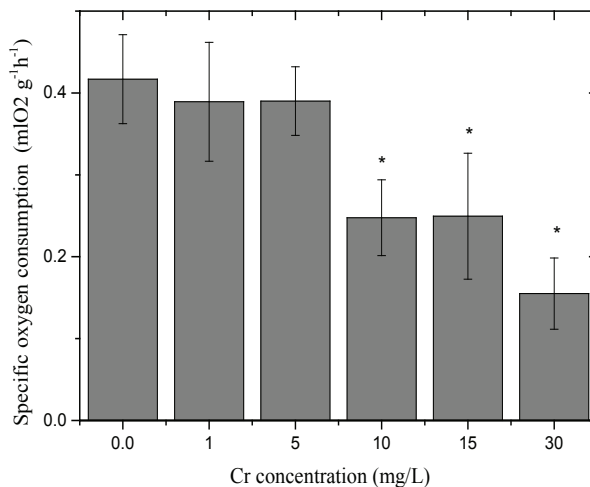


Figura 1. Consumo específico de oxígeno en mL O₂/g/h en juveniles de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) expuestos a diferentes concentraciones de cromo (VI). Las columnas representan los promedios (n = 7) y las barras la respectiva desviación estándar. *Diferencia estadística en comparación con el control

En la figura 1 se puede observar que los individuos de tilapia expuestos a cromo (VI) mostraron una disminución significativa en la tasa metabólica en comparación con el grupo control en concentraciones iguales o superiores a 10 mg/L. Se registró una reducción del 62.81 % de la tasa metabólica para la concentración más alta estudiada (30 mg/L), en comparación con el grupo control. Los valores de tasa metabólica para los peces expuestos a concentraciones de 10, 15 y 30 mg/L de cromo son estadísticamente diferentes, comparados con el grupo control (Figura 1), al realizarse la prueba de ANOVA de una vía ($P < 0.05$) y de Tukey ($P < 0.05$). Para las concentraciones de 1 y 5 mg/L hay un leve descenso en la tasa metabólica, pero no es significativamente diferente.

Los peces expuestos a dosis de cromo (VI) mostraron una reducción en la tasa metabólica. En estudios realizados por Yilmaz *et al* [10] con concentraciones de 30 mg/L, tilapias de la especie *Oreochromis aureus* presentaron trastorno respiratorio bastante alto dañando las branquias que son los órganos respiratorios y osmoreguladores vitales, reduciendo el área de superficie respiratoria, lo que también se refleja en este estudio al disminuir considerablemente su tasa metabólica con una diferencia significativa ($p < 0.05$). Vutukuru [11] obtuvo resultados que mostraron que la actividad respiratoria normal de peces de la especie *Labero rohita* expuestos a Cr(VI) se vio significativamente afectada y los peces presentaron una depresión en la tasa metabólica, reflejando el alcance de los efectos tóxicos del cromo (VI) a una concentración de 39.40 mg/L.

Resultados similares fueron obtenidos en un estudio realizado por Elsaeidy *et al* [40], al exponer tilapia (*O. niloticus*) a concentraciones de 15.00 y 30.00 mg/L de Cr⁶⁺ como agente generador de estrés provocando alteraciones y disfunción en su capacidad de sobrevivencia. En otro estudio realizado por Yu *et al* [41] al exponer peces a cromo hexavalente, el cual tiene una capacidad de oxidación fuerte y es 100 veces más tóxico que el Cr³⁺ provocó efectos negativos reflejándose en la dificultad en los procesos metabólicos, como la respiración celular. Esto se comprueba en este estudio al observarse una disminución en la reducción metabólica.

Excreción de amoníaco

Se midió la excreción de amoníaco de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) de peces que fueron expuestos en peceras con cromo (VI) (cuadro 2), en concentraciones de 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 y 30.0 mg/L. Los resultados obtenidos para la excreción de amoníaco con diferentes concentraciones de Cr⁶⁺ mostraron un aumento en la excreción cuando los especímenes se expusieron a 1.0 mg/L de cromo, en comparación con el grupo control. El aumento en la excreción de amoníaco fue de 3.56 veces mayor que el grupo control (cuadro 2). Para las concentraciones de 5.0, 10.0 y 15.0 mg/L de cromo (VI) la diferencia en la excreción de amoníaco fue de 2.47, 1.79 y 1.69 veces mayor, respectivamente; mientras que para la exposición a 30 mg/L fue de 1.51 veces mayor comparada con el grupo control.

En el cuadro 2 se puede observar la determinación de la excreción de amoníaco en mg/g/h en tilapia del Nilo (*O. niloticus*) expuesta a diferentes concentraciones de cromo (VI) de 0.0 (control), 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 y 30.0 mg/L, en respirómetros a una temperatura de 22 °C por un tiempo de 4 horas.

Cuadro 2. Media de la excreción de amoníaco (mg/g/h) de los individuos de tilapia en 4 horas de exposición a diferentes concentraciones de Cr⁶⁺ (n = 7, para cada concentración).

Parámetro	Control	1.0 mg/L	5.0 mg/L	10.0 mg/L	15.0 mg/L	30.0 mg/L
Media	0.0140	0.0499	0.0346	0.0250	0.0237	0.0212
Dest	0.0021	0.0248	0.0198	0.0113	0.0089	0.0163

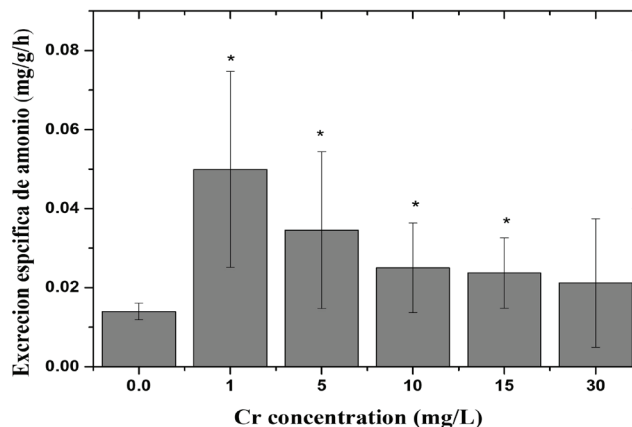


Figura 2. Excreción de amoníaco en mg/g/h en tilapia del Nilo (*O. niloticus*) a diferentes concentraciones de cromo (VI). Las columnas representan los promedios (n = 7) y las barras la respectiva desviación estándar. *Diferencia estadística en comparación con el control.

Las tasas de excreción de amoníaco presentan un aumento con una diferencia significativa para las concentraciones de 1.0, 5.0, 10.0 y 15.0 mg/L de cromo (VI), al realizar la prueba de ANOVA de una vía ($P < 0.05$) y de Tukey ($P < 0.05$), exhibiendo una propensión a disminuir la excreción de amoníaco con el aumento en la concentración del cromo, hasta la concentración de 30 mg/L que ya no presenta una diferencia significativa con el grupo control (figura 2).

En condiciones ambientales adversas, en las que se reduce la excreción de amoníaco, algunos peces pueden reducir la tasa de producción de amoníaco a partir del catabolismo de aminoácidos para ralentizar la acumulación interna de amoníaco (Yuen, 2010). Esto se comprueba en este estudio, en el cual se ve disminuida la excreción de amoníaco, para ralentizar el metabolismo. La excreción de amoníaco ocurre principalmente a través de las branquias de los peces [29], pero la exposición al cromo en animales acuáticos afecta el metabolismo y provoca hiperplasia branquial [42], observándose en este estudio que a mayor concentración de cromo hexavalente, la excreción de amonio disminuye.

Lorenzo-Márquez (2016) indica que la especie *Oreochromis niloticus* se alimenta de fauna bentónica, que se encuentra en los sedimentos [43], en donde se acumulan fracciones de metales pesados como cromo, que unidas a carbonatos se consideran biodisponibles y bioacumulables en sus tejidos [44] principalmente en branquias, intestinos [45], hígado y riñones [46], [47], y muy baja tendencia a la acumulación en los tejidos musculares [48]. Esto puede causar citotoxicidad y un impacto perjudicial o anormal en el comportamiento de los peces [46], como hipertrofia y paraplegia del epitelio branquial, natación desigual y suspensión de la alimentación, además de que disminuye el tiempo de coagulación de la sangre [48].

En otros estudios, se evidenció que la exposición de peces a cromo evidencia hipoxia con una menor utilización de oxígeno [48], lo que quedó demostrado en este estudio, ya que, al aumentar la concentración de cromo, aumentó el consumo de oxígeno mostrando un incremento en la actividad respiratoria (branquias), causada por el estrés al estar en un ambiente con mayor concentración de cromo.

El amoníaco, un producto final del catabolismo proteico [49], representa entre el 60 y el 80% de la excreción nitrogenada de los peces [50] por lo que se considera el principal producto de desecho de los peces [51] y un metabolito tóxico [52]. En los peces la producción de amoníaco ocurre principalmente en el hígado a partir de la transaminación y la posterior desaminación del exceso de un aminoácido; y también puede originarse en el músculo debido a la desaminación de adenilatos por el ejercicio de los peces que provoca una disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto [47]. Las branquias son un órgano crítico para los peces, ya que representan el sitio principal para el intercambio de gases, la regulación de iones y la excreción de productos de desecho metabólicos [53] como el amonio. La disminución significativa en el consumo de oxígeno es probablemente el resultado de alteraciones del metabolismo energético y es un criterio de valoración que proporciona un índice para el estrés subletal y para el biomonitoreo de los efectos tóxicos de productos químicos tóxicos, así como el aumento en la excreción de amonio, refleja un aumento en el catabolismo de los aminoácidos [54].

En este estudio se muestra que a bajas concentraciones de cromo los peces aumentan su consumo de oxígeno y también aumenta su tasa metabólica (mayor producción de amoníaco), pero a medida que aumenta la concentración de cromo, se inicia el daño en las branquias, se consume mayor cantidad de oxígeno, pero la tasa metabólica disminuye para gastar la menor cantidad de energía, mostrando una tolerancia hacia el cromo, ya que no hubo mortandad en los peces.

Los resultados de este estudio demuestran que el cromo es tóxico para la tilapia del Nilo (*O. niloticus*) la cual es una especie importante para el consumo como alimento en Guatemala y que la contaminación por cromo puede afectar la cadena alimenticia, ya que esta especie es comúnmente capturada para el consumo humano, lo que representa un riesgo para la población.

Conclusiones

La exposición al cromo hexavalente demostró ser altamente tóxica para la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) a niveles subletales e indujo a efectos nocivos tanto en el consumo de oxígeno como en la excreción de amoníaco en dos de sus funciones vitales.

Los resultados muestran que el metabolismo de la tilapia del Nilo (*O. niloticus*) fue afectado por la presencia de cromo hexavalente en agua a diferentes concentraciones. La disminución en la actividad respiratoria se evidencia con la disminución en el consumo de oxígeno a medida que aumenta la concentración de cromo hexavalente en el agua. La tasa metabólica disminuyó con el aumento en la concentración de cromo hexavalente en 6.62, 6.41, 40.60, 40.14 y 62.81 % para las concentraciones de 1.0, 5.0, 10.0, 15.0 y 30.0 mg/L respectivamente con relación al control.

Se observó un aumento en la excreción de amoníaco promedio del 257.69, 147.69, 79.21, 69.99 y 51.77% en la exposición a cromo (VI) en relación con el control, en concentraciones de 1.0, 5.0, 10.0 15.0 y 30.0 mg/L, disminuyendo la excreción de amoníaco a partir del máximo observado a 1.0 mg/L de cromo (VI) a medida que aumenta la concentración del cromo (VI), respecto al control. De esta forma puede considerarse que el consumo de oxígeno y la excreción de amoníaco se pueden utilizar como biomarcadores fisiológicos de tilapia del Nilo para aguas contaminadas con cromo (VI).

Los resultados de este estudio muestran que la tilapia (*Oreochromis niloticus*) es un organismo útil para el estudio de los efectos causados por el cromo hexavalente. Las tilapias presentaron un esfuerzo metabólico, bajo el efecto del cromo hexavalente, para adaptarse a un ambiente más contaminado, disminuyendo su metabolismo reflejado en la disminución en el consumo de oxígeno y la excreción de amonio, probablemente por el daño ocasionado en las branquias y el hígado.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración prestada por Instituto de Pesca – APTA SAA/SP, Governo do Estado de São Paulo, 11990-000 Cananéia, SP, Brasil, donde fue realizado el experimento.

Referencias

- [1] W. M. Warren-Vega, A. Campos-Rodríguez, A. I. Zárate-Guzmán, and L. A. Romero-Cano, "A Current Review of Water Pollutants in American Continent: Trends and Perspectives in Detection, Health Risks, and Treatment Technologies," in *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Mar. 2023, vol. 20, no. 5, p. 4499, doi: 10.3390/ijerph20054499.
- [2] Singh *et al.*, "Heavy Metal Contamination of Water and Their Toxic Effect on Living Organisms", *The Toxicity of Environmental Pollutants*. IntechOpen, Nov. 30, 2022. doi: 10.5772/intechopen.105075.
- [3] Chaudhary *et al.*, "Study on histo-chemical biomarkers of chromium induced toxicity in *Labeo rohita*," *Emerging Contaminants*. Sept. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100204>
- [4] C. Lau., C. Le. Cadmium, chromium, copper, iron, lead, mercury, nickel, and zinc in freshwater fish: Assessing trophic transfer using stable isotope ratios of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$. in *Journal of Environmental Sciences*. Jan. 2023. vol 128 pp 250-257.
- [5] A. A. Ibrahim-Alsaid, *et al.* Determination of trace metal levels in the sea and fresh water in Oman by using inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy. *Arab J Geosci* 16, 122, 2023, <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11210-w>
- [6] A. Y. Karim. Distribution of 26 metals in the waters of the aquatic ecosystems of the Cotonou Channel and Lake Nokoué, Benin. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, Feb. 2023 11, 13-28. doi:[10.4236/msce.2023.112002](https://doi.org/10.4236/msce.2023.112002).

- [7] J. G. Silva *et al.* "Genotoxic effect of heavy metals on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) species in a urban river in northeastern Brazil" in "Research Square". doi.org/10.21203/rs.3.rs-2778213/v1
- [8] H.H. Abbas and F.K. Ali. "Study the effect of hexavalent chromium on some biochemical, citotoxicological and histopatological aspects of the *Oreochromis* spp. fish", in "*Pakistan Journal of Biological Sciences*": PJBS. 2007 Nov 10 (22) 3973-3982. DOI: 10.3923/pjbs.2007.3973.3982. PMID: 19090268.
- [9] J. Sturla-Lompré., *et al.* "Effects of carbon nanoparticles and chromium combined exposure in native (*Ruditapes decussatus*) and invasive (*Ruditapes philippinarum*) Clams. *Nanomaterials*. 2023, 13, 690. <https://doi.org/10.3390/nano13040690>
- [10] A.B. Yilmaz *et. Al.* "Uptake and distribution of hexavalent chromium in tissues (gill, skin and muscle) of a freshwater fish, Tilapia, *Oreochromis aureus*" in "*Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*", vol 2(3), pp 2-33 April 2010. ISSN2141 – 226X © 2010 Academic Journals.
- [11] S.S. Vutukuru. "Acute effects of hexavalent chromium on survival, oxygel consumption, hematological parameters and some biochemical profiles of the Indian Mayor Carp, *Labeo rohita*", in "*Environmental Research and Public Health*". 2002, 2(3). 456-462. ISSN 1660-4601.
- [12] A.A.R. Mohamed, *et al.* "Effect of hexavalent chromium exposure on the liver and kidney tissues related to the expression of CYP450 and GCT genes of *Oreochromis niloticus* fish: Role of curcumin supplement diet" in *Exotoxicology and Environmental Safety*, vol 188, Jan 2020. doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109890
- [13] V. Wepener *et al.* "The effect of hexavalent chromium at different pH values on the jaematology of Tilapia *sparrmanii* (Cichlidae)", in "*Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*", vol 101 (2) Feb 1992, 375-381.
- [14] E. Barbieri., *et al.* "Bagre estuarino *Cathorops spixii* como bioindicador de metais pesados: um estudo de caso", en *Engenharia de Pesca: aspectos teóricos e práticos*. Cananéia, Brasil. 2022 Ch 6. Vol 3. pp 106-116. Doi 10.37885/211206960
- [15] M. Barbosa-Henriques *et al.*, "Sublethal of propiconazole on the metabolism of lambari *Deuterodon iguape* (Eigenmann 1907), a native species from Brazil", in *Fish Physiology and Biochemistry*. Springer. Jun. 2021. Vol 47 pp. 1165-1177. doi.org/10.1007/s10695-021-00968-z
- [16] R. C. Mendes *et al.* "Carbofuran affects behavior and metabolism of the Atlantic Forest lambari *Seuterodon iguape* a native species from Brazil" in "*Environmental Science and Pollution Reseachr*" 2021. vol 28. 61128-61136. doi.org/10.1007/s11356-021-15071-2
- [17] M. I. de Oliveira-Eiras., *et al.* "Cooper II oxide nanoparticles (CuONPs) alter metabolic markers and swimming activity in zebra-fish (*Danio rerio*)". "*Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. vol. 257, July 2022, 109343. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109343>
- [18] C. A. Da Silva *et al.*, "Effects of mycogenic nanoparticles on organisms of different trophic levels", in "*Chemosphere*" Elsevier. Dec. 2022. Vol 308, Part 3. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136540
- [19] FAO. "*Oreochromis niloticus*", in "*Cultured aquatic species fact sheets*". Text by J.E. Rakocy. Edited and compiled by Valerio Crespi and Michael New. Fao.org.
- [20] W. El-Houseiny *et al.* "Renal Damage, and Pseudomonas aeruginosa susceptibility in Oreochromis niloticus". "*Antioxidants 2022* Vol 11, (6), 1185; doi.org/10.3390/antiox11061185
- [21] F. Barreto-Curiel *et al.* Crecimiento, excreción de amonio y consume de oxígeno de la tilapia hibrida roja (*Oreochromis mossambicus x Oreochromis aureaus*) cultivada en agua de mar y en agua dulce" en "*Ciencias Marinas*", vol 41 No.3. Ensenada sep. 2015. Versión impresa ISSN 0185-3880
- [22] S. Özçelik and M. Canli. "Combined effects of metals (Cr⁶⁺, Hg²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺) and calcium on the serum biochemistry and food quality of the Nile fish (*Oreochromis niloticus*)". "*Journal of Food Composition and Analysis*". Vol. 115: 104968. doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104968
- [23] D. Roy *et al.*, "Bioaccumulation of heavy metal in urban pond reared *Oreochomis niloticus*, water, sediment, and handmade feed in Bangladesh and human health risk implications. "*Arabian Journal of Geosciences*". May. 2022. Vol. 15: 959. doi.org/10.1007/s12517-022-10260-w
- [24] D. Ghosh and S.K. Saha. "Determination of the lethal concentration 50% (LC₅₀) of hexavalent Chromium in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*)", "*Advances in Zoology and Botany*, Vol. 10, No. 4, 99 123-131. Sept. 2022. Doi: 10.13189/azb.2022.100406.
- [25] N.B. Metcalfe *et al.* "Does individual variation in metabolic phenotype predict fish behavior and performance?" in "*Journal of Fish Biology*", vol 88, 298-321. 2016. <https://doi.org/10.1111/jfb.12699>
- [26] D. Chabot *et al* (a). "Metabolic rate in fishes: definitions, methods and significance for conservation physiology" in "*Journal of Fish Biology*", vol 88, 1-9. 2016. Ddoi:10.1111/jfb.12873.

- [27] T. Norin, T.D. Clark. "Measurement and relevance of maximum metabolic rate in fishes", in "*Journal of Fish Biology*", vol 88, 122-151. 2016. <https://doi.org/10.1111/jfb.12796>
- [28] E.J. Eliason, A.P. Farrell. "Oxygen uptake in Pacific salmon *Oncorhynchus* spp.: when ecology and physiology meet", in "*Journal of Fish Biology*", vol 88, 359-388. doi:10.1111/jfb.12790
- [29] K, Yuen and S.F. Chew. "Ammonia production, excretion, toxicity, and defense in fish: a review" in "*Frontiers in Physiology*". Oct 2010. doi: 10.3389/fphys.2010.00134
- [30] M.N. Kutty. "Respiratory quotient and ammonia excretion in *Tilapia mossambica*" in "*Marine Biology*". Vol 16, 126-133 (1972).
- [31] D. Chabot *et al* (b). "The determination of standard metabolic rate in fishes", in "*Journal of Fish Biology*", vol 88, 81-121. 2016. <https://doi.org/10.1111/jfb.12845>
- [32] Fishbio. Heart-Stopping Science: The importance of fish physiology. Aug. 2015. Available: <https://fishbio.com/heart-stopping-science-the-importance-of-fish-physiology/>
- [33] C. Jorgensen, *et al*. "Modelling and interpreting fish bioenergetics: a role for behaviour, life-history traits and survival trade-offs", in "*Journal of Fish Biology*", vol 88, 389-402. doi:10.1111/jfb.12834
- [34] S.J. Kaushik. "Factores que afectan la excreción nitrogenada en teleósteos y crustáceos", en "*ACU*, nov. 2019
- [35] Barbieri, E. (2007). Use of Oxygen Consumption and Ammonium Excretion to Evaluate the Sublethal Toxicity of Cadmium and Zinc on *Litopenaeus schmitti* (Burkenroad, 1936, Crustacea). *Water environment research*. Vol. 79, 6.
- [36] Barbieri E. Branco, J.; Santos, M.; Hidalgo, K. (2013). Effects of cadmium and zinc on oxygen consumption and ammonia excretion of the Sea-Bob shrimp, according to the temperature. *Boletim instituto de Pesca, Sao Paulo*. 39(3): 299-309.
- [37] Santos, D.; Barbieri, E.; Bolondi, A.; Melo, C. (2014). Effects of lead in white shrimp (*Litopenaeus schmitti*) metabolism regarding salinity. *O Mundo da Saúde, Sao Paulo*. Vol 38 (1): 16-23.
- [38] Barbieri, E.; Oliveira, K.; Schultz, J.; Barbosa, M. (2019). Metabolic and histological alterations after exposing *Deuterodon iguape* to different salinities. *Boletim do Instituto de Pesca*. Instituto de Pesca. ISSN 1678-2305 inline version.
- [39] Barbieri E.; Tavares, E. (2011). The use of oxygen consumption and ammonium excretion to evaluate the toxicity of cadmium on *Farfantepenaeus paulensis* with respect to salinity. *Chemosphere*. Vol. 84, 9-16
- [40] I.M. Elsaedy, *et al*. "Multiple biomarkers response in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) exposed to sublethal concentrations of hexavalent chromium", in "*Egypt. J. Aquat. Biol. & Fish*". Vol 20, No. 2:37-49 (2016). ISSN 1110-6131
- [41] Z. Yu, *et al*. Toxic effects of hexavalent chromium (Cr⁶⁺) on bioaccumulation. Apoptosis, oxidative damage and inflammatory response in *Channa asiatica*", in "*Environmental Toxicology and Pharmacology*". Vol 87, oct 2021. doi.org/10.1016/j.etap.2021.103725
- [42] J.H. Kim and J.C. Kang. "The toxic effects in the stress and immune responses in juvenile rockfish, *Sebastes schlegelii* exposed to hexavalent chromium" in "*Environmental Toxicology and Pharmacology*", vol 43 april 2016 128-133.
- [43] H.Lorenzo-Márquez. (2016). "Estimación de riesgo de exposición a metales pesados por consumo de pecos (*Pterygoplichthys* spp.) en infantes de comunidades ribereñas de los ríos Grijalva y Usumacinta, México".
- [44] S. Dhanakumar *et al*. (2014). "Heavy metal partitioning in sediments and bioaccumulation in commercial fish species of three major reservoirs of river Cauvery delta region, India". *Ecotoxicol Environ Saf*. 2015 Mar;113:145-51. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.11.032. Epub 2014 Dec 10. PMID: 25497770.
- [45] E. Baysoy *et al*. (2012). "The effects of salinity and salinity + metal (Chromium and Lead) exposure on ATPase activity in the gill and intestine of Tilapia *Oreochromis niloticus*" in *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(2), 291-300. Doi:10.1007/s00244-012-9825-9.
- [46] Z. Hossain *et al*. (2021). Heavy metal toxicity in Buriganga river alters the immunology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L) in "*Heliyon* 7 e08285.
- [47] P.J. Pradeep *et al*. (2011) Trend in ammonia excretion during acclimatization of adult freshwater red hybrid Tilapia *Oreochromis mossambicus* (Peters, 1852) C *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) in different salinities in "*Our Nature*. 9:34-40.
- [48] S. Aslam & A.M. Yousafzai. (2017). "Chromium toxicity in fish: A review article". *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 5(3): 1483-1488.

- [49] E. Barbieri & L.A. Alves Ferreira. (2011). Effects of the organophosphate pesticide Folidol 600® en the freshwater fish, Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in "Pesticide Biochemistry and Physiology. 99: 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2010.09.002>
- [50] A.C.K. Benli et al. (2008). Sublethal ammonia exposure of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L): Effects on gill, liver and kidney histology in "Chemosphere" 72:1355-1358. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.037>
- [51] E. Sherif et al. (2008). Effect of ammonia on Nile Tilapia (*O niloticus*) performance and some hematological and histological measures. International Symposium on Tilapia in Aquaculture. 513-531.
- [52] C.S. Carvalho et al. (2012). Biomarker responses as indication of contaminant effects in *Oreochromis niloticus*, in "Chemosphere" 89:60-69. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.013>
- [53] Z. Birungi et al. (2007). Active biomonitoring of trace heavy metals using fish (*Oreochromis niloticus*) as bioindicator species. The case of Nakivubo wetland along Lake Victoria in "Physics and Chemistry of the Earth 32: 1350-1358. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.034>
- [54] E. Barbieri. Effect of 2,4-D herbicide (2,4-dichlorophenoxyacetic acid) on oxygen consumption and ammonium excretion of juveniles of *Geophagus brasiliensis* (Quoy & Gaimard, 1824) (Osteichthyes, cichlidae) in "Ecotoxicology". DOI 10.1007/s10646-008-0256-3

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Factores críticos para la adopción de tecnologías en café: evidencia de la Región Brunca de Costa Rica

Critical factors for technology adoption in coffee: evidence from the Brunca Region of Costa Rica


David Gómez-Castillo¹, Anthony Cubero-Zamora², Luz E. Barrantes-Aguilar³, Vanessa Villalobos-Ramos⁴

Fecha de recepción: 13 de septiembre, 2023
Fecha de aprobación: 17 de enero, 2024

Gómez-Castillo, D; Cubero-Zamora, A; Barrantes-Aguilar, L. E; Villalobos-Ramos, V. Factores críticos para la adopción de tecnologías en café: evidencia de la Región Brunca de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 61-73.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6901>

1 Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

 david.gomez@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-7321-0453>


2 Investigador independiente externo, Alajuela, Costa Rica.

 anthony.cubero.zamora@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1274-503X>


3 Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

 luz.barrantes@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5691-6657>

4 Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

 vanessa.villalobos@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-3701-517X>



Palabras clave

Econometría; producción agrícola; política agraria; investigación agrícola; tecnología adecuada; transferencia de tecnología

Resumen

La adopción de tecnologías agrícolas se promueve como alternativa para aumentar la productividad de los sistemas agroalimentarios, mejorar la seguridad alimentaria, mejorar los ingresos de las personas productoras y adaptar los sistemas productivos a los desafíos del cambio climático. A pesar de todos estos esfuerzos la adopción de tecnología es baja en algunas regiones. Esta investigación se enfocó en la identificación de los factores críticos que inciden en la adopción de tecnología en personas productoras de café en la Región Brunca de Costa Rica. Utilizando el índice de adopción de tecnologías para la región, se generaron clústeres que fueron utilizados como variable dependiente para el desarrollo de un modelo probit ordenado. La recopilación de información de campo se realizó mediante visitas durante el mes de agosto de 2021 para un total de 192 fincas cafecultoras. Los resultados muestran que las variables determinantes en la adopción de tecnología son la edad, la ubicación geográfica, el nivel de producción anual promedio en fanegas por hectárea, la educación, los años de producir café y las variedades utilizadas (Sarchimor y Obata).

Keywords

Econometrics; agricultural production; agricultural policy; agricultural research; appropriate technology; technology transfer

Abstract

The adoption of agricultural technologies is promoted as an alternative to increase the productivity of agrifood systems, improve food security, improve the income of producers, and adapt production systems to the challenges of climate change. Despite all these efforts, technology adoption is low in some regions. This research focused on identifying the critical factors influencing technology adoption in coffee producers in the Brunca Region of Costa Rica. Using the technology adoption index for the region, clusters were generated and used as independent variables for the development of an ordered probit model. Field data collection was carried out through visits during August 2021 for a total of 192 coffee farms. The results show that the determining variables in the adoption of technology are age, geographic location, average annual production level in bushels per hectare, education, years of coffee production, and the varieties used (Sarchimor and Obata)

Introducción

El desarrollo del sector agrícola es el más eficiente en la reducción de la pobreza en aquellos países donde la agricultura tiene un papel importante en la economía del país [1]. El cambio climático afecta los sistemas agrícolas amenazando la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia [2], aunado a estos problemas las personas productoras se enfrentan a limitaciones como el tamaño reducido de la tierra, falta de recursos y pérdida de calidad del suelo [3]. Las tecnologías agrícolas se promueven por gobiernos, centros de investigación y organizaciones como alternativas para aumentar la productividad, mejorar la seguridad alimentaria y los

ingresos agrícolas [4], [5] y reducir la pobreza, sin embargo, la adopción de estas tecnologías sigue siendo bajo [4], además, los beneficios de las nuevas tecnologías muchas veces no son evidentes en los entornos rurales [6].

El Censo Nacional Agropecuario realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (INEC) [7] evidenció que existe una relación directa entre el empleo agropecuario, la extensión agropecuaria y la pobreza, según estos datos un aumento en el porcentaje de personas que trabajan en agricultura incrementa en 0,5 % los hogares con necesidades básicas insatisfechas (NBI). Para el año 2019 la Región Brunca fue la de mayor pobreza a nivel nacional, alcanzando un 30,3 % de los hogares en pobreza según los datos de la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA) [8].

Según estadísticas del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, el cantón de Pérez Zeledón posee el 18,7 % del total de fincas cafetaleras del país, mientras que Coto Brus posee un 8,1 % [7] evidenciando que estos cantones dentro de sus principales actividades económicas se encuentra la agricultura.

Además de la inversión en investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras, resulta importante conocer los factores de éxito o rechazo de nuevas tecnologías. El éxito en la implementación de prácticas más sostenibles y productivas debe considerar estrategias específicas para la adopción de tecnología según las características de las personas productoras para lograr adaptar sus fincas al cambio climático y mejorar la productividad. Sin embargo, la adopción de nuevas tecnologías es una decisión compleja que depende de una gran cantidad de variables extrínsecas e intrínsecas [9], [10], y cada una de estas influyen de manera positiva o negativa en esta adopción.

Para explicar de mejor manera por qué algunas tecnologías, aunque muy prometedoras en la teoría son rechazadas en la práctica, se identifican cinco grandes categorías de variables que influyen en la adopción de tecnologías por parte de las personas productoras. Una primera categoría que agrupa las variables económicas, la segunda incluye variables de estructura y prácticas de la finca, una tercera categoría contempla las características de la persona productora, la cuarta con las variables que reflejan actitudes y opiniones sobre los esquemas y prácticas ambientales. Por último, la quinta categoría agrupa la conectividad social como servicios de extensión, capacitación, asociatividad, etc. [11].

En la primera categoría, las variables económicas más estudiadas se encuentran: el ingreso [12], [13], acceso al crédito [14], tenencia de la tierra [15], mano de obra [16]. Como resultado de algunas investigaciones se ha identificado que tener pocos ingresos representa una barrera para la adopción de tecnologías [17]–[19]. En cuanto a la tenencia de la tierra, esta variable puede representar una barrera para la adopción cuando ésta implica realizar inversiones en tierra que no es propia [20].

Una segunda categoría son las variables de estructura y característica de la finca. Dentro de esta categoría se identifica el tamaño de la finca [21], uso de variedades mejoradas [22] uso de abonos orgánicos (Chen y Chen, 2022), dentro de las variables más importantes. Si bien a mayor tamaño de la finca puede darse una mayor adopción de tecnologías [24], y un cambio técnico más rápido, en el caso de los pequeños productores que poseen tierras de menor tamaño la implementación de estas prácticas es más lenta [10], [25]. Al igual que el tamaño de la finca, la literatura muestra que la ubicación de esta tiene una influencia significativa en la adopción [26], [27].

La tercera categoría agrupa las características de la persona productora, como la edad, educación formal y género. Algunas investigaciones determinaron que el nivel de educación de la persona jefa de hogar influyó significativamente en la probabilidad de adopción de

algunas prácticas como lo son el uso de variedades mejoradas [28]. La edad también es un factor determinante [23], [27], [29], algunas personas indican que la adopción es mayor entre personas más jóvenes [30]–[32] y en los casos donde la persona a cargo de la finca era mujer, influía positivamente en la adopción de prácticas ambientales [17].

La cuarta categoría agrupa variables que reflejan actitudes y opiniones sobre los esquemas y prácticas ambientales en los sistemas productivos. Estudios indican que entre las variables asociadas positivamente con la adopción de prácticas de conservación se pueden mencionar, actitudes ambientales (ser proambiental) y una actitud positiva hacia el programa o práctica en particular [15], [17]. Algunas de las tecnologías más comunes que adoptan las personas productoras como prácticas de conservación, son el uso de abonos orgánicos en el suelo, que está relacionado a aspectos agronómicos y dimensiones ambientales, así como variables sociológicas, económicas y éticas que posee la persona para que tome la decisión de implementar esta práctica en su sistema productivo [33].

La quinta categoría agrupa las variables de conectividad social como el uso de servicios de extensión, capacitación, estar asociado(a) o agremiado(a). Algunos autores mencionan la importancia de los servicios de extensión y su papel en el desarrollo de habilidades y la transferencia de tecnología, dando como resultado mayores inversiones y adopción de esta tecnología especialmente en fincas familiares [34]. La literatura existente evidencia el efecto positivo y estadísticamente significativo en la adopción de tecnología cuando la persona productora tiene acceso a servicios de extensión y posee alguna membresía a una asociación de productores o una cooperativa [12], [23], [35], [36].

A pesar de estas investigaciones previas, aún persiste una limitada comprensión de los factores que influyen en las decisiones de las personas cafetaleras en zonas rurales y distantes de los principales centros de población como la Región Brunca en Costa Rica. El propósito de esta investigación es abordar esta brecha de conocimiento e identificar los factores críticos que inciden en la adopción de tecnologías en el cultivo de café en la Región Brunca de Costa Rica, lo cual resulta importante para entender las decisiones de las personas productoras hacia la adopción de tecnologías.

Metodología

El enfoque dado a la investigación es de carácter cuantitativo. Se desarrolla un modelo probit ordenado que permita explicar mediante sus efectos marginales los factores críticos en la adopción de las tecnologías en fincas caficultoras. La metodología empleada en este estudio se fundamenta en dos fuentes principales de datos: una revisión exhaustiva de literatura existente y la recopilación de datos primarios a través de una encuesta a personas cafetaleras de la Región Brunca.

En cuanto a la selección de la muestra, se adoptó una estrategia combinada que involucra tanto el muestreo no probabilístico por cuotas como el muestreo por conveniencia. En el primero, se asignaron proporciones específicas por cantón utilizando los datos reportados de la cosecha 2020 del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE) [37] y el muestreo por conveniencia. Esta técnica asegura una representación adecuada de las distintas áreas geográficas relevantes para el análisis y el muestreo por conveniencia se utilizó para facilitar el acceso a las personas productoras y la obtención de datos prácticos.

Según los datos recopilados, el cantón de Coto Brus cuenta con un total de 2457 productores de café, lo que equivale al 8,21 % del número total de personas caficultoras a nivel nacional. El cantón de Pérez Zeledón alberga a 5639 personas caficultoras, lo que constituye el 18,85 % del

total en el país. Para esta investigación se trabajó con una población total de 8096 caficultores en la Región Brunca (70 % personas productoras de Pérez Zeledón y 30 % de Coto Brus aproximadamente).

Antes de la aplicación de la encuesta, esta fue validada en campo y aprobada por el Comité Ético Científico de la Universidad de Costa Rica, donde se corroboró el cumplimiento de las buenas prácticas de ética y el consentimiento informado de las personas productoras para su partición libre en la investigación. Para la recolección de datos primarios en campo, fue muy importante la participación de agrupaciones de personas productoras y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de la Región Brunca para obtener las bases de datos de las personas cafetaleras de la zona de interés. Se calculó una muestra de 192 personas caficultoras (135 de Pérez Zeledón y 58 de Coto Brus) y la información fue recolectada en el mes de agosto del 2021 mediante visitas a finca por un equipo de 5 personas capacitadas.

Modelo probit ordinal

El desarrollo del modelo Probit ordinal toma como variable dependiente los clústeres (rezagado, bajo, medio y alto nivel de adopción) que se crearon a partir del índice de adopción de tecnologías (IA) para las personas productoras de café en la Región Brunca [38]. Estos clústeres evaluaron un total de 15 tecnologías⁵, y se agruparon de la siguiente manera: clúster 1 (IA rezagado, n=12 personas productoras) con un promedio de adopción de 57,7 % de las tecnologías, el clúster 2 (IA bajo, n=40 personas productoras) con 71,56 % de adopción, el clúster 3 (IA medio, n=81 personas productoras) con 83,81 % de adopción y el clúster 4 (IA alto, n=60 personas productoras) con 95,62 % de adopción. La información detallada de los clústeres se describe en [38].

Este tipo de modelos permiten utilizar como variable regresada aquellas que tienen más de dos resultados y no es posible expresarlas en una escala de intervalo, sino más bien responde a una escala tipo Likert, es decir, las respuestas se ordenan de menor a mayor [39]. Según Sánchez y Gómez., [40] el modelo probit ordinal es representado mediante la ecuación (1) para alguna función de la distribución F:

$$P(y = j|x, \alpha, \theta) = F(\alpha_{i+1} - x'\theta) - F(\alpha_j - x'\theta), j = 0, 1, \dots, m, \quad (1)$$

$$\alpha_0 = -\infty, \alpha_j \leq \alpha_{j+1}, \alpha_{m+1} = \infty$$

El modelo se deduce de la existencia de una variable latente representada mediante y_i^* , esta variable es obtenida de una variable continua que no se observa en el modelo y que determina el resultado de y por medio de la regla representada en la fórmula 2:

$$y = j \text{ sí y solo sí } \alpha_j < y^* < \alpha_{j+1}, j = 0, 1, \dots, m \quad (2)$$

Como es indicado en la literatura, la fórmula 3, muestra la relación existente entre las respuestas de la variable Y_i con las variables, $X_{1i} \dots X_{ki}$ para los modelos ordinales de respuesta múltiple mediante:

$$y_i^* = F(X_i\beta) + u_i = F(Z_i + u_i) \quad (3)$$

5 Como ejemplos de las tecnologías consideradas para la formación de los clústeres se encuentran: Uso de variedades más productivas, uso de variedades resistentes a plagas y enfermedades, aplicación de enmiendas, uso de fertilizantes orgánicos, prácticas de conservación de suelo, entre otras [38]

Donde y_i^* es una variable latente (no observada) que permite la cuantificación de las categorías, $F(.)$ es una función no lineal de tipo logística, distribución normal o bien de distribución de valor extremo, $X_i\beta$ es una combinación lineal de las variables o características que se denomina índice del modelo y se denota por Z_i , y u_i una variable aleatoria. Además, para los valores de la variable real u observada (Y_i) que mide las distintas categorías del modelo (cuatro para nuestro caso de estudio), emplea un esquema de variables representado como:

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si } y_i^* \leq c_1 \\ 2 & \text{si } c_1 \leq y_i^* \leq c_2 \\ 3 & \text{si } c_2 \leq y_i^* \leq c_3 \\ 4 & \text{si } c_3 \geq y_i^* \end{cases} \quad (4)$$

Los valores de los cortes en el modelo representados mediante c_m , así como los valores de β se estiman mediante el método de Máxima Verosimilitud, bajo el cumplimiento de la siguiente restricción:

$$c_1 < c_2 < c_3 \quad (5)$$

En los modelos probit ordinales la probabilidad de elegir o pertenecer a cada una de las categorías de Y_i se define mediante la siguiente relación:

$$\begin{aligned} P(Y_i = 1|X_i, \beta, c) &= \phi(c_1 - X_i\beta) \\ P(Y_i = 2|X_i, \beta, c) &= \phi(c_2 - X_i\beta) - \phi(c_1 - X_i\beta) \\ P(Y_i = 3|X_i, \beta, c) &= \phi(c_3 - X_i\beta) - \phi(c_2 - X_i\beta) \\ P(Y_i = 4|X_i, \beta, c) &= 1 - \phi(c_3 - X_i\beta) \end{aligned} \quad (6)$$

La interpretación de los modelos ordinales se efectúa a través de las derivadas parciales, en concreto a través de los efectos marginales.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(Y_i = 1)}{\partial X_k} &= \phi(c_1 - X_i\beta)\beta_k \\ \frac{\partial P(Y_i = 2)}{\partial X_k} &= \phi(c_2 - X_i\beta)\beta_k - \phi(c_1 - X_i\beta)\beta_k \\ \frac{\partial P(Y_i = 3)}{\partial X_k} &= \phi(c_3 - X_i\beta)\beta_k - \phi(c_2 - X_i\beta)\beta_k \\ \frac{\partial P(Y_i = 4)}{\partial X_k} &= 1 - \phi(c_3 - X_i\beta)\beta_k \end{aligned} \quad (7)$$

En este tipo de modelos, los coeficientes estimados no cuantifican de forma directa el incremento de la probabilidad dado el aumento en una unidad en la correspondiente variable independiente; los signos de cada coeficiente únicamente indican la dirección del cambio, la magnitud de la variación depende de los efectos marginales [40].

El modelo probit ordinal, así como la estimación de sus efectos marginales, las pruebas de bondad de ajuste y validación de los supuestos fueron desarrollados mediante el software estadístico Stata, desarrollado por StataCorp LLC (2015) versión 14, al 5 % de significancia.

Resultados

Para el desarrollo del modelo se utilizó como variable dependiente las categorías de índice de adopción (IA) generadas mediante los clústeres k-medias, y como independientes se consideraron aspectos sociodemográficos además de las características de la finca. Para la selección de un modelo probit ordinal, este debió cumplir tres supuestos teóricos: $Prob > Ch^2$ menor al 0,05 que rechaza la hipótesis nula de igualdad a cero de los coeficientes de regresión, un Pseudo R² de McFadden dentro del intervalo que va de 0,2 a 0,4 o lo más cercano posible y, por último, se busca que los signos de coeficientes de regresión se ajusten a la teoría estudiada. Para verificar el supuesto de probabilidades proporcionales o constancia de los efectos en las categorías, se empleó la prueba de Brant [41]. Esta elección se fundamenta en la robustez de los indicadores de constancia, que permite análisis comparativos entre las muestras. Asimismo, se llevaron a cabo varias pruebas de bondad de ajuste para modelos de regresión logística de respuesta ordinal entre las que se incluyen la prueba de Lipsitz [42], la prueba de Hosmer-Lemeshow para modelos ordinales [43] y las pruebas de Pulkstenis-Robinson [44]. El cuadro 1 muestra un resumen de las variables seleccionadas para el modelo probit ordinal.

Cuadro 1. Estadística descriptiva de las variables independientes utilizadas en el modelo.

Variable	Descripción	Variables cuantitativas				Variables categóricas (%)	
		Media	DE	Mín.	Máx.	1	0
Edad	Edad de la persona productora	52,13	11,48	20	85		
Años de producir café	Cantidad de años dedicado a la producción cafetalera (experiencia)	27,08	14,19	1	60		
Producción anual promedio	Producción anual promedio en fanegas por hectárea	17,43	8,08	0	42		
Cantón	1 = Coto Brus, 0 = Pérez Zeledón					0,30	0,70
Nivel de Educación							
Primaria incompleta	1= primaria incompleta, 0 = otro					0,18	0,82
Primaria completa	1= primaria completa, 0 = otro					0,61	0,39
Secundaria incompleta	1= secundaria incompleta, 0 = otro					0,14	0,86
Secundaria completa	1= secundaria completa, 0 = otro					0,04	0,96
Universitaria incompleta	1= universitaria incompleta, 0 = otro					0,03	0,97
Universitaria completa	1= universitaria completa, 0 = otro					0,02	0,98
Pertenece a una asociación de productores	1=Pertenece a una asociación de productores, 0 = no					0,65	0,35
Certificado	1=La finca está certificada, 0 = no lo está					0,32	0,68
Asistencia técnica	1=Recibe asistencia técnica, 0 = no recibe					0,50	0,50
Sarchimor ^a	1=Utiliza variedad Sarchimor, 0=no la utiliza					0,53	0,47
Obata ^b	1=Utiliza variedad Obata, 0=no					0,74	0,26

a) Cruce de Villa Sarchí con el Híbrido de Timor (CIFC 832/2) seleccionado en una 3era generación y b) Cruce natural de Sarchimor con Catuaí dando origen a Obarta | AC 1669-20 [45]

Factores críticos para la adopción

Los factores críticos para la adopción de tecnologías fueron determinadas mediante los efectos marginales del modelo probit ordinal (Cuadro 2). Se entiende como factores críticos aquellas variables que aumentan o disminuyen la probabilidad de que las personas productoras se ubiquen dentro de una categoría de IA.

Cuadro 2. Resumen de modelo probit ordinal y sus efectos marginales.

Variable	Coeficiente		Efectos Marginales							
			Prob(Y=1IX)		Prob(Y=2IX)		Prob(Y=3IX)		Prob(Y=4IX)	
Cantón	-0,7275 (0,2425)	***	0,0693 (0,0266)	***	0,1191 (0,0399)	***	0,0116 (0,0155)		-0,2001 (0,0647)	***
Edad	-0,016 (0,0090)	*	0,0015 (0,0009)	*	0,0026 (0,0014)	*	0,0002 (0,0003)		-0,0044 (0,0024)	*
Nivel de Educación										
Primaria Completa	0,075 (0,2358)		-0,0085 (0,0270)		-0,0127 (0,0405)		0,0017 (0,0069)		0,0196 (0,0611)	
Secundaria Incompleta	0,6462 (0,3240)	**	-0,0525 (0,0283)	*	-0,1069 (0,0542)	**	-0,0291 (0,0283)		0,1886 (0,0947)	**
Secundaria Completa	0,5152 (0,4848)		-0,0452 (0,0368)		-0,0866 (0,0792)		-0,0155 (0,0389)		0,1475 (0,1451)	
Universidad Incompleta	2,0158 (0,7618)	***	-0,078 (0,0275)	***	-0,2227 (0,0518)	***	-0,2723 (0,1249)	**	0,5784 (0,1615)	***
Universidad Completa	1,3955 (0,8648)		-0,0736 (0,0288)	**	-0,1936 (0,0802)	**	-0,1553 (0,1663)		0,4226 (0,2500)	*
Pertenece a una asociación de productores	0,2501 (0,1943)		-0,0238 (0,0189)		-0,0409 (0,0321)		-0,0040 (0,0059)		0,0688 (0,0531)	
Años de producir café	0,0174 (0,0070)		-0,0016 (0,0007)	**	-0,0028 (0,0011)		-0,0002 (0,0003)		0,0047 (0,0018)	**
Producción anual promedio	0,045 (0,0108)	***	-0,0042 (0,0013)	***	-0,0073 (0,0018)	***	-0,0007 (0,0009)		0,0123 (0,0027)	***
Certificado	0,0854 (0,0989)		-0,0081 (0,0096)		-0,0139 (0,0162)		-0,0013 (0,0023)		0,0235 (0,0271)	
Asistencia técnica	0,2756 (0,1754)		-0,0262 (0,0175)		-0,0451 (0,0289)		-0,0044 (0,0061)		0,7581 (0,0476)	
Sarchimor	0,4497 (0,1725)	***	-0,0428 (0,0186)	**	-0,0736 (0,0282)	***	-0,0071 (0,0095)		0,1237 (0,0460)	***
Obata	0,4707 (0,2052)	**	-0,0448 (0,2122)	**	-0,0770 (0,0335)	**	-0,0075 (0,0106)		0,1294 (0,0563)	**
n	193									
LR Chi ² (14)	77,66									
Prob > Chi ²	0,0000									
Log Likelihood	-197,8863									
Pseudo R ² McFadden	0,164									

Nota: 1 % de significancia (***), 5 % de significancia (**), 10 % de significancia (*). Error estándar entre paréntesis.

El modelo presenta un $Prob > Ch^2$ de 0,000 ($< 0,05$) lo cual brinda suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y afirmar que al menos uno de los coeficientes de regresión no es igual a cero. Si bien es cierto, el valor Pseudo R^2 McFadden del modelo seleccionado no se encuentra dentro del intervalo 0,2 y 0,4, como valores ideales [46], el valor de 0,164 obtenido es próximo a 0,2 por lo que se acepta el modelo considerando un buen ajuste.

En cuanto al clúster 1 (IA Rezagado), La variable cantón muestra que pertenecer a Coto Brus aumenta la probabilidad de pertenecer al grupo de más baja adopción en alrededor de un 6,93 %. Contar con un nivel de educación diferente al nivel 1 de educación (primaria incompleta) disminuye la probabilidad de estar en un nivel de IA de rezago entre un 5,25 % y un 7,80 % según el nivel máximo alcanzado de educación de la persona productora. Utilizar la variedad Sarchimor en la finca disminuye la probabilidad de pertenecer al grupo de IA rezagado en un 4,28 %, y usar la variedad Obata disminuye esta probabilidad en un 4,48 %. Las variables edad (0,15 %) años de producir café (0,16 %), fanega anual producida (0,42 %) presentan efectos muy bajos en las probabilidades de pertenecer a esta categoría de baja adopción.

En el clúster 2 (IA Bajo), y al igual que en el clúster 1, pertenecer al cantón de Coto Brus aumenta la probabilidad de pertenecer a esta categoría en un 11,91 %. Contar con educación diferente al nivel 1 (primaria incompleta) disminuye la probabilidad de estar en un nivel de IA bajo entre un 10,69 % y un 22,27 % según los diferentes niveles de educación. Utilizar la variedad Sarchimor en finca disminuye la probabilidad de pertenecer al grupo de IA bajo en un 7,36 %, lo mismo sucede con la variedad Obata, la probabilidad disminuye en un 7,70 %.

Para el clúster 3 (IA Medio), el modelo utilizado no logró determinar variables que fueran estadísticamente significativas y que influyan en las personas productoras para ubicarse en un IA Medio. En comparación con estar en el nivel más bajo de educación, las personas productoras con universidad incompleta disminuyen la probabilidad de estar en un nivel de IA medio en un 27,23 % (aunque esta relación no fue estadísticamente significativa).

Los resultados del clúster 4 (IA Alto) indican que las personas productoras que poseen una educación diferente al nivel 1 (primaria incompleta) aumentan la probabilidad de tener un nivel de IA alto entre un 18,86 %, y un 57,84 %, según el nivel de educación. Por cada fanega adicional producida por hectárea la probabilidad de tener un IA alto aumenta en un 12,37 %. Utilizar la variedad Sarchimor y Obata en finca aumenta la probabilidad de pertenecer al grupo de IA alto en un 12,37 %, y 12,94 % respectivamente. Pertenecer al cantón de Coto Brus disminuye la probabilidad de contar con un IA alto en un 20,01 %. La variable años de experiencia en la producción de café tiene un efecto muy bajo en la probabilidad de pertenecer al grupo con IA alto de un 0,47 %.

Discusión

Es posible observar que las personas cafetaleras que se ubican en Pérez Zeledón tienen mayor probabilidad de tener niveles altos de adopción, en comparación con las que se encuentran en el cantón de Coto Brus. Esto puede deberse a que el cantón de Pérez Zeledón cuenta con mayor acceso a infraestructura, servicios, organizaciones gremiales e instituciones financieras y estatales del sector agropecuario que apoyan la actividad cafetalera y a las personas productoras. La importancia de la ubicación para la adopción de tecnología ha sido identificada en otras investigaciones como una variable significativa [10], [12], [26] y otras investigaciones encontraron que el acceso a los servicios de extensión, insumos agrícolas, crédito y participación en grupos de productores influyen de manera significativa en la adopción de prácticas agrícolas de conservación [5].

Los resultados del estudio indican que a mayor educación de la persona productora aumenta la probabilidad de que adopten más tecnologías en sus sistemas productivos. Estos resultados coinciden con otras investigaciones que identificaron que los mayores niveles de educación son impulsores clave que favorece la adopción de tecnologías [1], [13], [47], así como su probabilidad e intensidad de la adopción [23].

En el caso de la variable edad, los resultados indican que las personas de menor edad tienen una probabilidad mayor de pertenecer a grupos de alta adopción, en comparación con las personas de mayor edad. Estos resultados son congruentes con otras investigaciones que indican que la edad de la persona productora tiene un papel importante en la adopción de tecnologías mejoradas de producción [26] y una influencia significativa en la elección de tecnologías de adaptación al cambio climático [31], [47], agricultura de conservación [27], [48] y en el uso de variedades mejoradas de los cultivos [13].

Los resultados muestran que las fincas con mayor producción anual promedio aumentan la probabilidad de ubicarse en categorías de alta adopción de tecnología. Esto podría estar relacionado al aumento en los ingresos en los casos de las fincas que presentan mayor producción anual. Algunas investigaciones encontraron que la adopción de tecnología incide en la productividad [25], en el rendimiento de los cultivos [16] y tiene un impacto significativo en los ingresos de las personas productoras [35], [49]. Otros autores indican que la situación económica de los hogares [48] y los ingresos [15] o en su defecto, no tener recursos suficientes [19], son variables que influyen de manera significativa en la adopción de tecnología y en la intensidad de adopción [50].

El uso de semilla mejorada como Sarchimor y Obata, influye en que las personas productoras tengan más probabilidad de tener un nivel alto de adopción. Esto debido a que el uso de estas variedades requiere la puesta en práctica de una serie de tecnologías agrícolas para su correcto desarrollo y productividad [45]. El uso de variedades mejoradas está vinculado a la productividad agrícola y disminución de la pobreza en las zonas rurales [13], [51] y en el impacto positivo que generan en los ingresos de los sistemas productivos [12].

Diferentes estudios han determinado que algunas variables como la asistencia técnica [27], [48], [52]–[54] y la pertenencia a una organización de productores [4], [47] se encuentran entre los factores que influyen en la adopción de tecnología. Sin embargo, en nuestro estudio estas variables no fueron estadísticamente significativas. Estos resultados están en línea con lo que han encontrado otras personas investigadoras en sus estudios quienes llegaron a la conclusión de que no existe un factor individual que sea consistente en todas las investigaciones y que explique por completo las decisiones de las personas productoras en cuanto a la adopción de tecnologías. Esto sugiere que puede haber un mayor peso en los niveles de las motivaciones intrínsecas de las personas [15], [19], [55] o en factores socio-psicológicos [56], por lo que algunas variables pueden mostrar resultados diferentes en distintos contextos o poblaciones.

Conclusiones

La adopción de prácticas en los sistemas productivos de café desempeña un papel fundamental en la sostenibilidad y estas prácticas son esenciales para afrontar de manera más efectiva los desafíos que surgen debido a los cambios constantes en el clima y la reducción de los ingresos de las personas productoras como resultado de la disminución de las cosechas. Los resultados de la investigación evidencian las variables que más influyen en la decisión final de que una persona productora adopte más o menos tecnologías. Conocer estas variables es importante para que actores de instituciones públicas y privadas puedan diseñar estratégicamente programas de comunicación y divulgación de las tecnologías más apropiadas para el cultivo. El diseño de estas estrategias debe ir acompañadas no solo del

trabajo técnico de los extensionistas y profesionales del sector, sino, deben ir acompañadas también de estrategias de motivación intrínsecas o extrínsecas que les permitan a las personas productoras la implementación y sostenibilidad de las tecnologías en el tiempo.

Agradecimientos

Agradecemos a las personas cafetaleras de la Región Brunca de Costa Rica que participaron voluntariamente en esta investigación. De igual manera a los técnicos especialistas en café que colaboraron en diferentes etapas del proyecto, a la oficina regional del Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Región Brunca por su colaboración y especialmente a la Ingeniera Natalia Hernández Benavides encargada de la AEA-MAG San Vito y al Ingeniero Olger Benavides Rivera encargado de la AEA-MAG Pejibaye de Pérez Zeledón.

Referencias

- [1] S. Diro, A. Tesfaye, and B. Erko, "Determinants of adoption of climate-smart agricultural technologies and practices in the coffee-based farming system of Ethiopia," *Agric Food Secur*, vol. 11, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s40066-022-00385-2.
- [2] R. B. Wakweya, "Challenges and prospects of adopting climate-smart agricultural practices and technologies: Implications for food security," *J Agric Food Res*, vol. 14, p. 100698, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jafr.2023.100698.
- [3] G. Zerssa, D. Feysa, D. Kim, and B. Eichler-Lobermann, "Challenges of Smallholder Farming in Ethiopia and Opportunities by Adopting Climate-Smart Agriculture," *Agriculture*, vol. 11, no. 192, 2021, doi: 10.3390/agriculture110301.
- [4] S. Ruzzante, R. Labarta, and A. Bilton, "Adoption of agricultural technology in the developing world: A meta-analysis of the empirical literature," *World Dev*, vol. 146, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.worlddev.2021.105599.
- [5] N. Y. Selya, P. Dimoso, and Y. J. Mgale, "Exploring the Adoption and Impact of Conservation Agriculture among Smallholder Farmers in Semi-Arid Areas: Evidence from Chamwino District, Tanzania," *Research on World Agricultural Economy*, vol. 4, no. 2, pp. 47–61, Jun. 2023, doi: 10.36956/rwae.v4i2.801.
- [6] L. Beaman and A. Dillon, "Diffusion of agricultural information within social networks: Evidence on gender inequalities from Mali," *J Dev Econ*, vol. 133, pp. 147–161, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jdeveco.2018.01.009.
- [7] INEC, VI Censo Nacional Agropecuario. Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica. 2015.
- [8] SEPSA, "Informe Comercio Exterior del Sector Agropecuario I Trimestre 2018 -2019," 2020.
- [9] Y. Vecchio, M. De Rosa, F. Adinolfi, L. Bartoli, and M. Masi, "Adoption of precision farming tools: A context-related analysis," *Land use policy*, vol. 94, no. July 2019, p. 104481, 2020, doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104481.
- [10] H. T. Mulugeta and A. Heshmati, "Impacts of improved agricultural technology adoption on welfare in Africa: A meta-analysis," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, p. e17463, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17463.
- [11] X. B. Lastra-Bravo, C. Hubbard, G. Garrod, and A. Tolón-Becerra, "What drives farmers' participation in EU agri-environmental schemes?: Results from a qualitative meta-analysis," *Environ Sci Policy*, vol. 54, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1016/j.envsci.2015.06.002.
- [12] E. D. Setsofia, W. Ma, and A. Renwick, "Effects of sustainable agricultural practices on farm income and food security in northern Ghana," *Agricultural and Food Economics*, vol. 10, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s40100-022-00216-9.
- [13] Y. Mugumaarhahama et al., "Socio-economic drivers of improved sweet potato varieties adoption among smallholder farmers in South-Kivu Province, DR Congo," *Sci Afr*, vol. 12, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00818.
- [14] S. Kumar, D. R. Singh, A. Singh, N. P. Singh, and G. K. Jha, "Does adoption of soil and water conservation practice enhance productivity and reduce risk exposure? Empirical evidence from semi-arid tropics (SAT), India," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 17, Sep. 2020, doi: 10.3390/SU12176965.
- [15] L. S. Prokopy et al., "Adoption of agricultural conservation practices in the United States: Evidence from 35 years of quantitative literature," *J Soil Water Conserv*, vol. 74, no. 5, pp. 520–534, Sep. 2019, doi: 10.2489/jswc.74.5.520.
- [16] M. A. M. Miah, R. W. Bell, E. Haque, M. W. Rahman, M. A. R. Sarkar, and M. A. Rashid, "Conservation agriculture practices improve crop productivity and farm profitability when adopted by Bangladeshi smallholders in the Eastern Gangetic Plain," *Outlook Agric*, 2023, doi: 10.1177/00307270221150830.

- [17] F. Benitez-Altuna, J. Trienekens, V. C. Materia, and J. Bijman, "Factors affecting the adoption of ecological intensification practices: A case study in vegetable production in Chile," *Agric Syst*, vol. 194, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.agsy.2021.103283.
- [18] T. Liu, R. J. F. Bruins, and M. T. Heberling, "Factors influencing farmers' adoption of best management practices: A review and synthesis," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 2, pp. 1–26, 2018, doi: 10.3390/su10020432.
- [19] I. J. Jambo, J. C. J. Groot, K. Descheemaeker, M. Bekunda, and P. Tittonell, "Motivations for the use of sustainable intensification practices among smallholder farmers in Tanzania and Malawi," *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, vol. 89, no. May, p. 100306, 2019, doi: 10.1016/j.njas.2019.100306.
- [20] P. Ranjan et al., "Understanding barriers and opportunities for adoption of conservation practices on rented farmland in the US," *Land use policy*, vol. 80, pp. 214–223, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.landusepol.2018.09.039.
- [21] M. J. Carrer, H. M. de S. Filho, M. de M. B. Vinholis, and C. I. Mozambani, "Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil," *Technol Forecast Soc Change*, vol. 177, no. July 2021, 2022, doi: 10.1016/j.techfore.2022.121510.
- [22] N. Kumar et al., "Challenges and opportunities in productivity and sustainability of rice cultivation system: a critical review in Indian perspective," *Cereal Research Communications. Akademiai Kiado ZRt.*, Dec. 01, 2021, doi: 10.1007/s42976-021-00214-5.
- [23] Z.-D. Chen and F. Chen, "Socio-economic factors influencing the adoption of low carbon technologies under rice production systems in China," *Carbon Balance Manag*, vol. 17, no. 1, p. 19, Dec. 2022, doi: 10.1186/s13021-022-00218-6.
- [24] D. Johnson, M. Almaraz, J. Rudnick, L. E. Parker, S. M. Ostoja, and S. D. S. Khalsa, "Farmer Adoption of Climate-Smart Practices Is Driven by Farm Characteristics, Information Sources, and Practice Benefits and Challenges," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, May 2023, doi: 10.3390/su15108083.
- [25] M. Gautam and M. Ahmed, "Too small to be beautiful? The farm size and productivity relationship in Bangladesh," *Food Policy*, vol. 84, no. March 2018, pp. 165–175, 2019, doi: 10.1016/j.foodpol.2018.03.013.
- [26] S. A. Donkoh, S. B. Azumah, and J. A. Awuni, "Adoption of improved agricultural technologies among rice farmers in Ghana: a multivariate probit approach," *Ghana Journal of Development Studies*, vol. 16, no. 1, p. 46, May 2019, doi: 10.4314/gjds.v16i1.3.
- [27] M. E. Ngaiwi et al., "Do farmers' socioeconomic status determine the adoption of conservation agriculture? An empirical evidence from Eastern and Southern Regions of Cameroon," *Sci Afr*, vol. 19, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01498.
- [28] N. Siyum, A. Giziew, and A. Abebe, "Factors influencing adoption of improved bread wheat technologies in Ethiopia: empirical evidence from Meket district," *Heliyon*, vol. 8, no. 2, p. e08876, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e08876.
- [29] A. Belay, J. W. Recha, T. Woldeamanuel, and J. F. Morton, "Smallholder farmers' adaptation to climate change and determinants of their adaptation decisions in the Central Rift Valley of Ethiopia," *Agric Food Secur*, vol. 6, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.1186/s40066-017-0100-1.
- [30] Y. Vecchio, G. P. Agnusdei, P. P. Miglietta, and F. Capitanio, "Adoption of precision farming tools: The case of Italian farmers," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, no. 3, 2020, doi: 10.3390/ijerph17030869.
- [31] M. Marie, F. Yirga, M. Haile, and F. Tquabo, "Farmers' choices and factors affecting adoption of climate change adaptation strategies: evidence from northwestern Ethiopia," *Heliyon*, vol. 6, no. e03867, pp. 1–20, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.c03867.
- [32] A. Torres, "Exploring the adoption of technologies among beginning farmers in the specialty crops industry," *Agricultural Finance Review*, vol. ahead-of-p, no. ahead-of-print, 2022, doi: 10.1108/afr-04-2021-0052.
- [33] C. Chenu, D. A. Angers, P. Barré, D. Derrien, D. Arrouays, and J. Balesdent, "Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations," *Soil Tillage Res*, vol. 188, pp. 41–52, May 2019, doi: 10.1016/j.still.2018.04.011.
- [34] R. Jara-Rojas, R. Canales, J. M. Gil, A. Engler, B. Bravo-Ureta, and C. Bopp, "Technology adoption and extension strategies in mediterranean agriculture: The case of family farms in Chile," *Agronomy*, vol. 10, no. 5, 2020, doi: 10.3390/agronomy10050692.
- [35] A. S. Bro, D. C. Clay, D. L. Ortega, and M. C. Lopez, "Determinants of adoption of sustainable production practices among smallholder coffee producers in Nicaragua," *Environ Dev Sustain*, vol. 21, no. 2, pp. 895–915, 2019, doi: 10.1007/s10668-017-0066-y.
- [36] C. Dong, H. Wang, W. Long, J. Ma, and Y. Cui, "Can Agricultural Cooperatives Promote Chinese Farmers' Adoption of Green Technologies?," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 20, no. 5, Mar. 2023, doi: 10.3390/ijerph20054051.

- [37] ICAFE, "Compendio estadístico: Actividad cafetalera 2019-2020," Heredia, Costa Rica, 2021.
- [38] A. Cubero, D. Gómez, L. E. Barrantes, and V. Villalobos, "Índice de Adopción de Tecnologías en Café, Región Brunca, Costa Rica," *e-Agronegocios*, vol. 8, no. 2, pp. 27–44, Jul. 2022, doi: 10.18845/ea.v8i2.6143.
- [39] D. N. Gujarati and P. Dawn, *Econometría*, 5ta ed. Ciudad de México: McGraw-Hill International, 2010.
- [40] E. Sánchez and D. Gómez, "Modelos de elección discreta: Revisión y aplicación mediante cuadratura gaussiana," Tesis para optar por la maestría en matemáticas aplicadas, Universidad Eafit, Medellín, 2008.
- [41] R. Brant, "Assessing proportionality in the proportional odds model for ordinal logistic regression," *Biometrics*, vol. 46, no. 4, pp. 1171–1178, 1990, doi: 10.2307/2532457.
- [42] S. R. Lipsitz, G. M. Fitzmaurice, and G. Molenberghs, "Goodness-of-fit tests for ordinal response regression models," *J R Stat Soc Ser C Appl Stat*, vol. 45, no. 2, pp. 175–190, 1996, doi: 10.2307/2986153.
- [43] D. W. Hosmer and S. Lemeshow, *Applied logistic regression*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Applied-Logistic-Regression-Probability-Statistics/dp/0471356328>
- [44] E. Pulkstenis and T. J. Robinson, "Goodness-of-fit tests for ordinal response regression models," *Stat Med*, vol. 23, no. 6, pp. 999–1014, 2004, doi: 10.1002/sim.1659.
- [45] ICAFE, "Guía técnica para el cultivo del café," Heredia. Costa Rica, 2020.
- [46] D. Lee, "A Comparison of Choice-based Landscape Preference Models between British and Korean Visitors to National Parks," *Life Sci J*, vol. 10, no. 2, pp. 1097–8135, 2013, Accessed: Mar. 13, 2022. [Online]. Available: <http://www.lifesciencesite.comhttp://www.lifesciencesite.comhttp://www.lifesciencesite.com.286>
- [47] K. Sanogo, I. Touré, D.-D. A. A. Arinloye, E. R. Dossou-Yovo, and J. Bayala, "Factors affecting the adoption of climate-smart agriculture technologies in rice farming systems in Mali, West Africa," *Smart Agricultural Technology*, vol. 5, p. 100283, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100283.
- [48] Z. Oyetunde-Usman, K. O. Olagunju, and O. R. Ogunpaimo, "Determinants of adoption of multiple sustainable agricultural practices among smallholder farmers in Nigeria," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 9, no. 2, pp. 241–248, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.iswcr.2020.10.007.
- [49] O. S. Oduniyi, C. Chagwiza, and T. Wade, "Welfare impacts of conservation agriculture adoption on smallholder maize farmers in South Africa," *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 37, pp. 672–682, 2022, doi: 10.1017/s1742170522000308.
- [50] Y. Zeng, Y. Tian, K. He, and J. Zhang, "Environmental conscience, external incentives and social norms in rice farmers' adoption of pro-environmental agricultural practices in rural Hubei province, China," *Environmental Technology (United Kingdom)*, vol. 41, no. 19, pp. 2518–2532, Aug. 2020, doi: 10.1080/09593330.2019.1574907.
- [51] W. D. Biru, M. Zeller, and T. K. Loos, "The impact of agricultural technologies on Poverty and Vulnerability of Smallholders in Ethiopia: A Panel Data Analysis," *Soc Indic Res*, vol. 147, pp. 517–544, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s11205-019-02166-0>.
- [52] B. T. Anang, S. Bäckman, and T. Sipiläinen, "Adoption and income effects of agricultural extension in northern Ghana," *Sci Afr*, vol. 7, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2019.e00219.
- [53] J. P. Aryal et al., "Adoption of multiple climate-smart agricultural practices in the Gangetic plains of Bihar, India," *Int J Clim Chang Strateg Manag*, vol. 10, no. 3, pp. 407–427, Apr. 2018, doi: 10.1108/IJCCSM-02-2017-0025.
- [54] C. M. Musafiri et al., "Adoption of climate-smart agricultural practices among smallholder farmers in Western Kenya: do socioeconomic, institutional, and biophysical factors matter?," *Heliyon*, vol. 8, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08677.
- [55] C. Bopp, A. Engler, P. M. Poortvliet, and R. Jara-Rojas, "The role of farmers' intrinsic motivation in the effectiveness of policy incentives to promote sustainable agricultural practices," *J Environ Manage*, vol. 244, no. April, pp. 320–327, 2019, doi: 10.1016/j.jenman.2019.04.107.
- [56] M. Delaroché, "Adoption of conservation practices: what have we learned from two decades of social-psychological approaches?," *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 45. Elsevier B.V., pp. 25–35, Aug. 01, 2020. doi: 10.1016/j.cosust.2020.08.004.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Compuestos orgánicos volátiles biogénicos: estado del arte sobre metodologías de muestreo y cuantificación de sus emisiones gaseosas

Volatile biogenic organic compounds: state of the art on sampling methodologies and quantification of their gas emissions

Jose Carlos Mora-Barrantes¹


Fecha de recepción: 22 de septiembre, 2023

Fecha de aprobación: 6 de febrero, 2024

Mora-Barrantes, J. C. Compuestos orgánicos volátiles biogénicos: estado del arte sobre metodologías de muestreo y cuantificación de sus emisiones gaseosas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 74-88.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6907>

¹ Laboratorio de Química de la Atmosfera, Escuela de Química. Universidad Nacional. Costa Rica.

 jose.mora.barrantes@una.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>



Palabras claves

Compuestos orgánicos volátiles biogénicos; técnicas analíticas; cromatografía; espectrometría; plantas.

Resumen

Los compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVB) son producidos por una gran diversidad de fuentes en los ecosistemas terrestres (flores, tallos, troncos, raíces, hojarasca, entre otros). Entre los diferentes tipos de COVB están los compuestos; terpenoides, oxigenados, alcanos, alquinos, haluros orgánicos, entre otros. La presente investigación realiza una descripción del estado del arte en relación con las diferentes metodologías aplicadas para el muestreo y cuantificación de los compuestos orgánicos volátiles biogénicos. El presente proyecto evaluó 20 diferentes investigaciones para las cuales se analizaron los COVB en diferentes ambientes (bosques, ciudades, plantas específicas, zonas agrícolas, flores, patógenos, ecosistemas mediterráneos, entre otros). Los resultados indican que existen varias técnicas utilizadas en la cuantificación de los COVB, siendo las dos técnicas analíticas que se utilizan mayormente las técnicas basadas en cromatografía de gases (GC), como cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS), GC con detector de ionización de llama (GC-FID) y desorción térmica-cromatografía de gases-espectrometría de masas (TD-GC-MS); y las técnicas fundamentadas en espectrometría de masas basada en ionización química suave, como espectrometría de masas de tubo de flujo de iones seleccionados (SIFT-MS) y espectrometría de masas de reacción de transferencia de protones (PTR-MS). Se concluye que la elección de las técnicas analíticas adecuadas para el análisis de COVB depende de los objetivos específicos del estudio, las características de la muestra y la sensibilidad requerida. Las técnicas basadas en GC, como GC-MS, GC-FID y TD-GC-MS, se utilizan para la identificación y cuantificación precisa de COVB en muestras complejas, mientras que la espectrometría de masas basada en ionización química suave, como SIFT-MS y PTR-MS, se utiliza en situaciones que requieren una respuesta en tiempo real y una alta sensibilidad.

Keywords

Biogenic volatile organic compounds; analytical techniques; chromatography; spectrometry; plants.

Abstract

Volatile Organic Biogenic Compounds (VOBC) are produced by a wide variety of sources in terrestrial ecosystems (flowers, stems, trunks, roots, leaf litter, among others). Among the different types of VOBC are compounds such as terpenoids, oxygenated compounds, alkanes, alkynes, organic halides, among others. The current research provides a description of the state of the art regarding the various methodologies applied for the sampling and quantification of biogenic volatile organic compounds (BVOCs). The present project evaluated 20 different studies in which BVOCs were analysed in various environments (forests, cities, specific plants, agricultural areas, flowers, pathogens, Mediterranean ecosystems, among others). The results indicate that there are several techniques used in the quantification of BVOCs, with the two analytical techniques most commonly used being gas chromatography-based techniques, such as gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography with flame ionization detection (GC-FID), and thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry (TD-GC-MS); and techniques based on soft chemical ionization mass spectrometry, such as selected ion flow tube mass spectrometry (SIFT-MS) and proton transfer reaction mass spectrometry (PTR-

MS). It is concluded that the choice of suitable analytical techniques for the analysis of BVOCs depends on the specific objectives of the study, sample characteristics, and required sensitivity. Gas chromatography-based techniques, such as GC-MS, GC-FID, and TD-GC-MS, are used for the precise identification and quantification of BVOCs in complex samples, while soft chemical ionization mass spectrometry techniques, such as SIFT-MS and PTR-MS, are employed in situations that require real-time response and high sensitivity.

Introducción

Los compuestos orgánico volátiles biogénicos (COVB) son producidos por una variedad de fuentes en los ecosistemas terrestres, que incluyen flores, tallos, troncos, raíces, hojarasca, microbios del suelo, insectos y animales [1]. Existe una enorme variedad de COVB que se sintetizan y emiten a la atmósfera, los cuales participan en el crecimiento, desarrollo, reproducción y defensa de las plantas. Los COVB se pueden clasificar en varios grupos, como se reporta en las investigaciones de *Fuentes et al.* [2], Guenther [1] y Kesselmeier y Staudt [3], así como Speight [4]. Estos investigadores clasifican los COVB en compuestos como; terpenoides, compuestos oxigenados, alcanos y alquenos, haluros orgánicos, compuestos sulfuros orgánicos, compuestos derivados del benceno, entre otros.

Compuestos terpenoides

Los compuestos terpenoides se consideran el COVB dominante a escala mundial. Este grupo increíblemente diverso incluye miles de especies químicas que pueden clasificarse como hemiterpenoides (isopreno), monoterpenoides (α -pineno), sesquiterpenoides (β -cariofileno), entre otros. Particularmente el isopreno es reconocido como el compuesto biogénico global dominante emitido a la atmósfera [1],[5]. La distribución taxonómica de la emisión de isopreno es amplia, siendo las especies emisoras de isopreno particularmente comunes en las familias *Salicaceae*, *Fagaceae* y *Palmae*, así como en el género *Picea* (píceas) y diversos helechos [6]. Sin embargo, las emisiones de isopreno son menos comunes entre las plantas herbáceas y de cultivo [5].

Compuestos oxigenados

Las plantas emiten varios compuestos orgánicos volátiles oxigenados (COVO). El metanol y la acetona se encuentran entre los COV más abundantes en la atmósfera mundial y representan el 6% y el 3%, respectivamente, de la emisión global anual de COVB. Se estima que los ecosistemas terrestres son responsables del 42-78% de la producción mundial anual de metanol [7],[8]. Mientras que la acetona proveniente de la vegetación contribuye entre un 22% y un 35 % a la emisión global anual de acetona [7]. Otros compuestos orgánicos volátiles oxigenados incluyen compuestos de carbonilo y ácidos orgánicos. Las plantas pueden producir una gran cantidad de compuestos de carbonilo, incluidos formaldehído, acetaldehído, propanal, acetona, butanal, i-butanal, butenal, i-butenal, 2-butanona, crotonaldehído, 2-pentanona, 2-metil-2-pentanona, hexanal, (E)-2-hexenal, (Z)-3-hexenal, benzaldehído y metil-vinil-cetona (MVK) [2],[3],[9].

Alcanos y alquenos

Investigaciones han reportado una variedad de emisiones de alcanos de árboles, cultivos y pastizales y pantanos. Los líquenes, musgos y brezos también se discutieron como fuentes potencialmente relevantes [2]. Sin embargo, según *Guenther et al.*[1], su contribución global de la vegetación terrestre al balance atmosférico es baja. En cuanto a los alquenos, se conocen

importantes fuentes biogénicas terrestres de eteno, propeno y buteno de bosques. No obstante, los cultivos de uso agrícola muestran un mayor porcentaje de emisiones de eteno y propeno que los árboles forestales con emisión de una gran cantidad de isoprenoides [2]-[3],[9].

Haluros orgánicos

Los haluros orgánicos, incluidos el bromuro de metilo, el cloruro de metilo y el yoduro de metilo, pueden ser producidos por la vegetación. Aunque los flujos de haluros de metilo son pequeños en comparación con las emisiones de terpenoides, estos representan una fuente importante de halógenos en la estratosfera, donde juegan un papel importante en el agotamiento del ozono estratosférico. Los ecosistemas terrestres son tanto una fuente como un sumidero de estos compuestos [2],[3],[9].

Compuestos orgánicos de azufre

Las emisiones de azufre orgánico biogénico de los ecosistemas marinos y terrestres representan una fuente importante de compuestos de azufre atmosférico en ambientes limpios. Los microbios del suelo y las plantas son fuentes de compuestos que incluyen metil mercaptano, sulfuro de etilo y disulfuro de dimetilo. Investigaciones han estimado que la contribución de los ecosistemas terrestres es de aproximadamente el 15% del flujo global de sulfuro de dimetilo, y el resto proviene de los océanos [2],[3],[9].

Compuestos derivados de benceno

Es ampliamente reconocido que hay varios compuestos bencenoides emitidos como aromas florales, como benzaldehído, anisol y alcohol bencílico, etc. Se cree que estas emisiones de bencenoides florales hacen una pequeña contribución a las emisiones regionales anuales de COVB, pero pueden ser una emisión importante en lugares específicos [2],[3],[9]. Entre los compuestos biogénicos, el isopreno y los monoterpenos son los más estudiados, con una serie de publicaciones que cubren; su síntesis y factores de emisión [10], los flujos del dosel [11], sus proporciones de mezcla atmosférica [12] y su papel atmosférico [2]. Esto fue confirmado por Guenther [9], cuya revisión mostró que la mayoría de los estudios en todo el mundo se centraron en los ecosistemas forestales, ricos en isopreno y monoterpenos, y que había poco interés en los COVB de la agricultura, dadas sus bajas emisiones de terpenoides. Sin embargo, las investigaciones de la década de 1990 destacaron la emisión de cantidades sustanciales de COVB oxigenados de los cultivos [13].

Análisis de compuestos orgánicos volátiles biogénicos

Se han utilizado varias técnicas para el seguimiento en línea de los COVB en la atmósfera. Entre las dos técnicas analíticas que se utilizan mayormente para la cuantización de los COVS emitidos por plantas están; (1) técnicas basadas en cromatografía de gases (GC), como cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS), GC con detector de ionización de llama (GC-FID) y desorción térmica-cromatografía de gases-espectrometría de masas (TD-GC-MS); y (2) espectrometría de masas basada en ionización química suave, como espectrometría de masas de tubo de flujo de iones seleccionados (SIFT-MS) y espectrometría de masas de reacción de transferencia de protones (PTR-MS) [14].

Métodos basados en cromatografía de gases (GC)

La cromatografía de gases es un método bien establecido de separación química continua de uno o más compuestos individuales entre dos fases: una fase fija llamada fase estacionaria y una fase móvil que consiste en un gas portador que fluye sobre la fase estacionaria. Cuando

se inyecta a través de una entrada calentada, los componentes entran en la fase estacionaria simultáneamente, pero se mueven a diferentes velocidades, dependiendo de la presión de vapor de cada compuesto y su solubilidad en la fase estacionaria. Al final de la columna, los compuestos se detectan e identifican en función del tiempo de retención, sabiendo que un tiempo de retención es característico para un compuesto y la fase estacionaria a una temperatura dada [14].

En la técnica de GC, la temperatura de la columna se controla para obtener una buena separación y resolución de los analitos. Dado que la concentración de COV emitidos por las plantas puede ser bastante baja, el monitoreo en línea de los COV con GC generalmente requiere una concentración previa de la muestra en la que la muestra de aire pasa a través de un tubo enfriado que contiene material de empaque. Los detectores de cromatografía de gases más comunes para la investigación de COV en plantas son los detectores de ionización de llama (FID) y los espectrómetros de masas [14].

Los FID son detectores simples y de bajo costo para compuestos orgánicos. Cuando se utiliza un espectrómetro de masas como detector, el análisis de los patrones de fragmentación de los iones en cada punto del cromatograma de iones totales permite la identificación de compuestos. Los detectores se calibran específicamente para cada compuesto orgánico volátil presente usando estándares conocidos, para desarrollar factores de respuesta y rangos operativos lineales para el método [14]-[17].

Espectrometría de masas con tubo de flujo de iones seleccionados (SIFT-MS)

La espectrometría de masas con tubo de flujo de iones seleccionados (SIFT-MS) es una técnica de ionización química blanda que utiliza la ionización química de los COV con H_3O^+ , NO^+ y O_2^+ como iones reactivos. SIFT-MS es un instrumento sensible adecuado para el monitoreo en tiempo real de los COV de la planta [18]. Los iones precursores se generan a través del agua y el aire en un resonador de microondas, produciendo muchos iones diferentes. Un filtro de masas de cuadrupolo permite la selección del ion precursor deseado (H_3O^+ , NO^+ u O_2^+) [14].

Los iones precursores ingresan al tubo de flujo que consiste en un cilindro de metal, donde se usa helio como gas portador. La muestra se introduce en el tubo de flujo a través de un capilar de muestreo calentado con un flujo constante (generalmente 30 mL min^{-1}). Más abajo en el tubo de flujo, los iones precursores reaccionan con los COV de la muestra y los ionizan. Los COV ionizados son filtrados por el cuadrupolo de detección y detectados por el detector de iones [14]. Basado en el recuento de iones precursores y en una biblioteca cinética bien establecida para el tubo de flujo, es posible calcular las concentraciones de gases traza sin más calibración del instrumento. SIFT-MS presenta la ventaja de proporcionar mediciones en tiempo real, hasta ppbv, con diferentes iones precursores disponibles, lo que aumenta la selectividad y la identificación de gases [14].

Reacción de transferencia de protones: espectrometría de masas (PTR-MS)

La espectrometría de masas con reacción de transferencia de protones (PTR-MS) es una técnica en línea relativamente nueva para la medición y el control de una amplia gama de compuestos orgánicos volátiles (COV) de fuentes y procesos muy diferentes, en bajas concentraciones en muestras gaseosas. Utilizando ionización química de baja energía, combina los atributos deseables de alta sensibilidad (10-100 pptv) y tiempo de respuesta rápido (1-10 s) con buena precisión y exactitud [19]. PTR-MS utiliza una fuente de descarga de cátodo hueco combinada con una región de deriva de la fuente para generar iones de hidronio con una pureza superior al 99,5 %. El aire por analizar se bombea continuamente a través de un reactor de tubo de deriva,

y una fracción de los COV, aquellos con una afinidad de protones superior a la del agua ($\approx 697 \text{ kJmol}^{-1}$), se ioniza mediante reacciones de transferencia de protones a partir de moléculas de agua protonadas. (H_3O^+) [14].

Los iones resultantes se separan posteriormente de acuerdo con su relación masa/carga mediante un cuadrupolo (QUAD) o un espectrómetro de masas de tiempo de vuelo (TOF) y se detectan cuantitativamente aguas abajo. El instrumento brinda datos sin procesar en conteos por segundo (cps), que deben convertirse para obtener concentraciones en partes por mil millones (ppb) [14].

PTR-MS presenta varias ventajas, incluida la mayor sensibilidad para la investigación de COVB en tiempo real en comparación con las otras técnicas disponibles. Puede equiparse para tener diferentes iones precursores, que aumentan la potencia analítica del instrumento. Además, la energía de colisión ion-molécula en un tubo de deriva, conocida como E/N, se puede cambiar fácilmente modificando los parámetros del campo eléctrico en los electrodos y, por lo tanto, mejorando el poder analítico del instrumento. Sin embargo, dado que PTR-MS da la concentración de todos los compuestos del mismo peso molecular, no permite un análisis cualitativo de los isómeros [20],[21].

Por lo tanto, las técnicas de medición establecidas para el monitoreo de COVB in situ generalmente ofrecen una compensación entre la frecuencia de muestreo (PTR-MS) y la especiación (GC-FID, GC-MS). En el intento de combinar estas dos características complementarias en un solo instrumento, se han desarrollado sistemas de GC rápidos y se han acoplado a instrumentos PTR-TOF-MS. Estos sistemas muestran resultados prometedores ya que permiten la separación de compuestos isoméricos en corridas espectrales rápidas. Mediante el uso de una columna bastante corta recubierta con una fase polar baja y la aplicación de un gradiente de temperatura muy rápido, el análisis de mezclas de COV y la separación de isómeros se pueden realizar en menos de un minuto. Sin embargo, los métodos basados en Fast-GC conservan la capacidad de separación de la cromatografía de gases convencional, pero ofrecen una frecuencia de medición significativamente mejorada [22]-[24].

Investigaciones relativas sobre el uso de métodos analíticos para la cuantificación y análisis de COVB

Kännaste et al. [25] determinaron mediante un método de cromatografía de gas (GC) diferentes isoprenoides emitidos por plantas, entre ellos isopreno, monoterpeno, homoterpenos y sesquiterpenos. La técnica se fundamentó en la adsorción de los diferentes compuestos de interés en cartuchos absorbentes de multicapa seguido de termodesorción y detección y posterior análisis por cromatografía de gases y espectrometría de masas. Los autores recomiendan el uso de un gas de arrastre con una pureza mínima del 99.999%, caso contrario la impurezas del gas pueden contaminar los absorbentes en el tubo de adsorción, pudiendo esta situación interferir en la identificación y medida de las áreas de los picos de los compuestos a determinar.

Alcaraz et al. [26] al igual que *Kännaste et al.* [25] se basaron principalmente en la técnica de cromatografía de gases para llevar a cabo sus estudios. Los autores monitorearon los COVB del *Eucalyptus Citriodora* mediante técnicas analíticas distintas a las anteriores. *Alcaraz et al., 2001* utilizaron el método analítico denominado SPME (Solid Phase Microextracción o Microextracción en Fase Sólida), el cual es una técnica de preconcentración y extracción del COVB. La técnica utiliza fibra de sílica o polimérica que se recubre con el material de extracción y se introduce en la muestra a analizar. Los compuestos de interés fueron adsorbidos en la fibra durante un periodo de tiempo determinado y posteriormente se analizaron mediante cromatografía

de gases. De acuerdo con *Alcaraz et al.* [26] las mejores fibras para monitorear los COVB producidos por *E. Citriodora* fueron las recubiertas con los adsorbentes sólidos de polímero poroso. Las cantidades extraídas utilizando la fibra recubierta con polímero líquido (PDMS) fueron menores en comparación con las fibras recubiertas con sólidos, y la mayoría de los picos de COVB no se pudieron discriminar de la señal de fondo.

Otra investigación que utilizó la cromatografía de gases combinada con la espectrometría de masas (GC-MS) fue la llevada a cabo por *González et al.* [27]. En este estudio se analizaron los compuestos orgánicos volátiles (COV) presentes en las flores sin aroma de 14 especies de *Tillandsia*. El sistema de muestreo utilizado fue la microextracción en fase sólida de cabeza espacial (HS-SPME) en combinación con GC-MS para identificar y cuantificar los COV en las muestras. Los resultados del estudio identificaron un total de 72 COV de las 14 especies de estudiadas, incluyendo hidrocarburos alifáticos, monoterpenos, sesquiterpenos, alcoholes, aldehídos y ésteres. Los compuestos más abundantes fueron α -pineno, β -myrceno, γ -terpineno, β -pineno y limoneno. Se encontraron diferencias significativas en la composición de los COV entre las especies, lo que sugiere que la producción de COV puede ser un rasgo importante en la diferenciación y evolución de estas especies. En general, los resultados del estudio destacan la presencia de una amplia variedad de COV en flores sin aroma de *Tillandsia* y sugieren que la producción de COV puede ser un rasgo importante en la diferenciación y evolución de estas especies. El uso de HS-SPME/GC-MS como técnica de análisis también demostró ser una herramienta efectiva para la identificación y cuantificación de COV en muestras de flores sin aroma de *Tillandsia* [27].

Al igual que *González et al.* [27], *Fajardo et al.* [28] utilizó un cromatógrafo de gases y espectrómetro de masas (GC/MS) durante su investigación. *Fajardo et al.* [28] estimó las emisiones biogénicas urbanas en Bogotá de COV en la especie *Eucalyptus globulus* Labill. Se utilizó un equipo de cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC-MS) para identificar y cuantificar los COV emitidos por la especie. *Fajardo et al.*, (2021) determinó que el isopreno es el compuesto químico predominante en la ciudad, por encima de los monoterpenos. Se indica además que las emisiones de COV de la especie varían según la hora del día y la temporada del año, lo que sugiere que las condiciones ambientales pueden influir en la producción de COV por parte de la especie. Finalmente, los autores indican que las emisiones de COV biogénicos en áreas urbanas es una fuente de información valiosa que se debe considerar en la gestión de la calidad del aire urbano y en la planificación urbana.

Esta técnica analítica de GC/MS también fue aplicada para evaluar el papel de los COVB como mecanismo de defensa para las plantas ante el ataque de patógenos. De acuerdo con *Castorina et al.* [29] ante el ataque de patógenos, las plantas experimentan rápidamente cambios fisicoquímicos complejos, como la producción de nuevas sustancias químicas o alteraciones en las propiedades de la membrana y la pared celular, para reducir los daños causados por las enfermedades. Una amenaza subestimada está representada por los nematodos parásitos de las raíces. *Castorina et al.* [29] se enfocaron en estudiar los COVB y el marcador molecular PR1 en la vid *Vitis vinifera* L., después de ser inoculada con el nematodo *Xiphinema index*. El estudio utilizó una metodología de muestreo y análisis que implicó la recolección de muestras de hojas y raíces de las plantas de vid inoculadas con el nematodo y de plantas de control que no habían sido inoculadas. Las muestras se analizaron mediante GC/MS. Los resultados de la investigación mostraron que la inoculación con el nematodo *Xiphinema index* aumentó la emisión de ciertos COVB por parte de las plantas de vid, lo que sugiere que estos compuestos pueden estar involucrados en la respuesta de la planta al estrés provocado por la presencia del nematodo

Las técnicas cromatográficas de gases y espectrometría de masas les permitieron a Wouter y Pierik [30] estudiar la influencia de los COVB en la interacción entre plantas. De acuerdo con Wouter y Pierik [30] uno de los factores más importantes para dar forma a las comunidades de plantas es la competencia entre plantas, que afecta a la disponibilidad de factores ambientales como la luz, los nutrientes y el agua. En respuesta a estos parámetros ambientales, las plantas ajustan la emisión de muchos compuestos orgánicos volátiles biogénicos diferentes. Los COVB también pueden provocar respuestas en las plantas vecinas, constituyendo así una plataforma para las interacciones entre plantas. Wouter y Pierik [30] analizaron la relación entre la emisión de COVB y la competencia entre plantas vecinas. La investigación indica que los COVB pueden actuar tanto como aleloquímicos y como señales de detección de vecinos. La investigación indica además que estos compuestos proporcionan información sobre los competidores vecinos, como su identidad o tasa de crecimiento.

Kesselmeir et al.[31] investigaron el efecto que los COVB presentan sobre el balance de compuestos oxidantes y en la formación de material particulado en la atmósfera. Se examinaron las emisiones de COV naturales de las plantas y su papel en el equilibrio oxidante y la formación de partículas. El estudio se centró en comprender cómo las emisiones de COV por parte de las plantas afectan la composición química de la atmósfera y cómo esto puede influir en la calidad del aire y en la formación de aerosoles. Los investigadores recopilaron y analizaron datos de emisiones de COVB provenientes de diversas especies de plantas. Utilizaron técnicas de muestreo de aire y análisis químico GC-MS para medir y cuantificar los VOC emitidos. Además, llevaron a cabo experimentos en laboratorio para investigar los efectos de las emisiones de COVB en la formación de aerosoles y en el equilibrio oxidante de la atmósfera. *Kesselmeir et al.*[31] resaltan como principales resultados que las plantas emiten una amplia variedad de COVB, incluyendo terpenos, aldehídos y alcoholes. Estas emisiones de COVB tienen un impacto significativo en la composición química de la atmósfera. Los COVB emitidos por las plantas pueden reaccionar con otros compuestos presentes en el aire, como óxidos de nitrógeno y radicales hidroxilos, para formar ozono y aerosoles orgánicos secundarios.

El análisis de COVB mediante GC-MS también se utilizó en la investigación Zhaobin [32]. Esta pesquisa valoró la emisión de COVB en ecosistemas mediterráneos, incluyendo las emisiones de las plantas, así como en el intercambio y las concentraciones de los suelos y sus posibles conductores. Las especies de interés estudiadas fueron *Erica multiflora* y tres especies de *Quercus ilex L.*, estas últimas son predominantes en el bosque mediterráneo. La principal conclusión es que las mayores emisiones de COVB se pueden esperar debido a; al incremento de las emisiones foliares, al intercambio y concentración de los suelos, y a la deposición de nitrógeno. Esta deposición puede estimular a futuras emisiones de isoprenoides en condiciones de clima seco en la región del mediterráneo [32].

Otros estudios han implementado variantes en la técnica de espectrometría de masas para la identificación y cuantificación de COVB. Por ejemplo, *Lin et al.* [33] investigaron las características y la reactividad química de los COVB emitidos por las especies forestales dominantes en el área de Jing-Jin-Ji, China. El estudio se centró en comprender la composición química de los COVB emitidos por las especies forestales y evaluar su potencial impacto en la calidad del aire y la formación de contaminantes atmosféricos. Los investigadores realizaron mediciones de campo en áreas forestales seleccionadas en la región de Jing-Jin-Ji, recolectaron muestras de aire en diferentes estaciones del año. Como método analítico se utilizó TCT-GC-MS, que se refiere a la técnica analítica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) con detección por tiempo de vuelo (TOF). La TCT (Time-Of-Flight Chemical Ionization) es una variante de la espectrometría de masas que se utiliza para identificar y cuantificar compuestos químicos presentes en una muestra. En la TCT-GC-MS, la muestra se introduce en un cromatógrafo de gases, donde los componentes se separan en función de

sus propiedades físicas y químicas. Posteriormente, los compuestos separados se introducen en el espectrómetro de masas de tiempo de vuelo. En este tipo de espectrómetro, los iones generados a partir de los compuestos se aceleran hacia un detector en función de su masa y carga eléctrica. La medida del tiempo que tarda cada ion en llegar al detector proporciona información sobre la masa del compuesto y, por lo tanto, su identidad. Los investigadores además llevaron a cabo experimentos de laboratorio para evaluar la reactividad química de los COV y su capacidad para formar contaminantes atmosféricos.

El estudio anterior reveló que las especies forestales dominantes en el área de Jing-Jin-Ji emiten una amplia variedad de COVB, entre estos isoprenos, monoterpenos y compuestos aromáticos. La composición variaba entre las diferentes especies forestales y también mostraba variaciones estacionales. Además, se encontró que los COVB emitidos por las especies forestales tenían una alta reactividad química y eran capaces de reaccionar con otros contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno, para formar contaminantes secundarios, como el ozono y las partículas finas. Estos hallazgos sugieren que las emisiones de COV de las especies forestales pueden contribuir significativamente a la formación de contaminantes atmosféricos en el área de Jing-Jin-Ji. También se observó que las emisiones de COV eran más altas durante las estaciones cálidas, lo que indica que las condiciones ambientales, como la temperatura y la radiación solar, pueden influir en la producción y emisión de COV por parte de las especies forestales [33].

Otro estudio realizado por *Aydin et al.* [34], que al igual que los investigadores anteriores [33] analizaron muestras de COVB mediante desorción térmica (TD, Thermal Desorption) y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS). En su estudio se compara la emisión de COVB tanto de árboles con hojas anchas con respecto a las emisiones de especies de árboles coníferos de Turquía. En esta investigación el sistema de muestreo utilizado consistió en la instalación de cámaras de cuarzo cerradas alrededor de las ramas de los árboles, lo que permitió la recogida de muestras de aire para su análisis químico. Las muestras se recogieron durante el día y la noche en diferentes estaciones del año, y se analizaron las muestras mediante desorción térmica y GC/MS. Las principales conclusiones fueron que las emisiones de COV de los árboles de hoja ancha eran significativamente más altas que las de los árboles coníferos, tanto en términos de cantidad total como de variedad de compuestos. Los árboles de hoja ancha emitieron una amplia gama de compuestos, incluyendo isoprenoides, terpenos y compuestos aromáticos, mientras que los árboles coníferos emitieron principalmente monoterpenos. Además, se encontró que la emisión de COVB variaba según la estación del año, con los árboles de hoja ancha emitiendo más COV en primavera y verano y los árboles coníferos emitiendo más COV en otoño e invierno. Según *Aydin et al., 2014*, se demostró que los árboles de hoja ancha emiten mayores cantidades y variedades de COV que los árboles coníferos, y que la emisión de COV varía según la estación del año. Estos hallazgos pueden ser útiles para la gestión de la calidad del aire y la planificación urbana en áreas con diferentes tipos de cobertura forestal [34].

La investigación realizada por Corada [35] también utilizó el método de desorción térmica combinado con otras técnicas como la cromatografía de gases con detección de llama (FID). Este autor realizó estudios sobre las emisiones de los COVB con el fin de evaluar el impacto que estas tienen sobre la química de la troposfera. Sobre este tema Corada (2012) caracterizó las emisiones y determinó los factores de emisión de los COVB en distintas etapas de crecimiento de dos especies arbóreas de la Región Metropolitana: una nativa, *Quillaja saponaria* (Quillay) y otra exótica, *Quercus suber* (Alcornoque), con el fin de contribuir al conocimiento de las reacciones radicalarias y fotoquímicas que generan contaminantes secundarios en la atmósfera. El muestreo se realizó en una cámara de encierro estático por adsorción en tubos TENAX incorporando sensores de control de temperatura, humedad relativa

y radiación fotosintéticamente activa. Las muestras fueron desorbidas y concentradas mediante un equipo de desorción térmica automático (DTA) y se cuantifican mediante GC-FID. Entre otros resultados se indican que factores meteorológicos como: la radiación fotosintéticamente activa, la humedad relativa y la temperatura afectan a la emisión de los COVB.

El detector de ionización de llama (FID) también fue utilizado en la investigación de Peralta [36], el cual determinó los factores de emisión de COVB para especies arbóreas nativas y estimó su aporte a la descontaminación atmosférica, con fin de mejorar los inventarios de emisión y las estrategias de descontaminación del aire en la Región Metropolitana de Santiago de Chile. El estudio identificó y cuantificó mediante técnicas analíticas experimentales de campo (muestreo en tubos Tenax TA, polímero poroso de óxido de 2,6-difenileno) y laboratorio (La desorción y el análisis del isopreno y los terpenos se realizó utilizando un equipo de desorción térmica Perkin Elmer ATD-400, conectado, vía una línea de transferencia, a un cromatógrafo de gases HP 5890 II, con detector de ionización de llama (FID), las emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles, particularmente isopreno y monoterpenos en las siguientes especies nativas: *Cryptocaria alba* (peumo), *Schinus molle* (pimiento), *Acacia caven* (espino) y *Maytenus boaria* (maitén). Entre los principales hallazgos están que el isopreno es, en general, la especie química emitida mayoritariamente, la cual reacciona más rápidamente con el radical OH, pudiendo eventualmente generar ozono.

Compuestos orgánicos volátiles biogénicos también fueron analizados mediante cromatografía de gases con detección de ionización de llama por Valencia *et al.* [37]. En la investigación se estudiaron la variabilidad en los perfiles de emisión de COVB en plantas de papa y trigo como respuesta a pesticidas para el control de plagas. Se recopilaron muestras de aire en cámaras de crecimiento controladas, donde las plantas se expusieron a diferentes plagas o se mantuvieron libres de plagas como control. Las muestras de aire se analizaron utilizando técnicas analíticas avanzadas (GC-FID) para identificar y cuantificar los COV emitidos por las plantas en presencia y ausencia de plagas. Los resultados de la investigación revelaron que las plantas emiten diferentes perfiles de COV en respuesta a la presencia de plagas. Se observaron aumentos significativos en la emisión de ciertos COV en las plantas infestadas con plagas en comparación con las plantas no infestadas. Estos perfiles de emisión proporcionaron una señal distintiva que permitió la detección temprana de la presencia de plagas en las plantas. Además, Valencia *et al.*, 2002, encontraron que los perfiles de emisión de COV variaban dependiendo del tipo de plaga y la interacción específica con la planta. Cada planta-plaga mostró un patrón único de emisión de COV, lo que sugiere que estos perfiles podrían utilizarse para la fenotipificación y caracterización de las interacciones planta-plaga.

El método anterior (GC/FID) se combinó con detector selectivo de masas (GC/MS) por Limonchi [38]. En su investigación Limonchi [38] evaluó las emisiones de COVB en bosques tropicales. Limonchi (2010) implementó un sistema de monitoreo y análisis de COVB en campo, que permitió la caracterización de su perfil de emisión y su cuantificación. De acuerdo con el investigador estas emisiones pueden ser utilizadas, a largo plazo, como un indicador rápido del estado fisiológico del bosque, y del posible cambio en la biodiversidad de éste. Entre los compuestos elegidos para el monitoreo se encuentran los terpenoides, que son los principales COVB emitidos por bosques tropicales. En la primera etapa de este trabajo, se diseñó un sistema de captura de compuestos volátiles que permitió la caracterización y cuantificación de estos en escala de laboratorio. El método empleado fue la extracción gas-sólido. Para realizar la captura de los COVB en las matrices, se utilizó un sistema de captura dinámico, mediante el uso de bombas volumétricas de muestreo. Los análisis de estas muestras fueron realizados mediante GC utilizando para ellos dos distintos equipos: cromatógrafo de gases equipado con detector por ionización de llama (GC/FID), y uno equipado con un detector selectivo de masas (GC/MS). Según Limonchi [38], los sistemas de muestreo dinámico o de captura por arrastre,

son métodos cuantitativos adecuados para la detección de COVB tanto en laboratorio como en campo. Sin embargo, si bien el sistema de procesamiento de muestras vía elución por solvente demostró ser válido para los análisis en laboratorio, no lo fue así para el trabajo de campo, presumiblemente debido a la baja concentración de COVB en la zona de monitoreo elegida.

Otros métodos analíticos para la determinación de COV emitidos por plantas es la espectrometría de masas de tiempo de vuelo con transferencia de protones (PTR-TOF-MS), *técnica de alta resolución y sensibilidad para el análisis in situ* de COVB oxigenados conocido como volátiles foliares verdes (GLV, Green Leaf Volatiles), no obstante, su rendimiento está influenciado de manera dramática por la humedad y el campo eléctrico. Sobre el uso de este método Pang [39] realizó una evaluación de la calibración, el efecto de la humedad y la dependencia del campo eléctrico reducido para el análisis de COVB usando esta técnica PTR-TOF-MS. Pang, X [39] utilizó un sistema de muestreo de flujo constante en el que se inyectaron diferentes concentraciones de mezclas de gases de calibración y se midieron las señales de PTR-TOF-MS. Además, se realizaron experimentos con diferentes niveles de humedad y voltajes de campo eléctrico para evaluar la sensibilidad y la estabilidad de la técnica. Los resultados del estudio demostraron que el PTR-TOF-MS es un método preciso y sensible para el análisis de COVB, pero que su rendimiento puede verse afectado por la humedad y la dependencia del campo eléctrico. Además, se encontró que la calibración adecuada y la selección cuidadosa del campo eléctrico pueden mejorar significativamente la precisión y sensibilidad de la técnica. En general, Pang, X [39], destaca la importancia de considerar el efecto de la humedad y la dependencia del campo eléctrico en la calibración y el análisis de PTR-TOF-MS para la medición precisa de COVB en el aire.

Estudios muy recientes, como el llevado a cabo por *Vermeuel et al.* [40] investigaron y caracterizaron los COVB emitidos por un bosque templado mixto durante el período de transición entre el verano y el otoño. Los investigadores también utilizaron la técnica de -TOF-MS. Se estudiaron y relacionaron los efectos de estos compuestos para comprender los efectos estacionales en las condiciones del bosque (temperatura, luz solar, área foliar y estado de la hoja de las plantas). Los COVB estudiados corresponden a los terpenoides isopreno monoterpenos y sesquiterpenos, así como un subconjunto de otros óxidos de monoterpenos y sulfuro de dimetilo. Los resultados revelaron que el bosque templado mixto emite una variedad de COVB durante la transición del verano al otoño, se identificaron compuestos como; terpenos, aldehídos y alcoholes, entre otros. Además, se encontró una correlación entre las emisiones de COVB y los factores ambientales, como la temperatura y la radiación solar.

Indicar que las emisiones de COV no solamente se han enfocado en su evaluación y cuantificación mediante métodos y técnicas analíticas, sino que también se han estimado sus concentraciones e impactos sobre los sistemas atmosféricos mediante modelos de estimación y modelos matemáticos como GloBEIS [41-43]. Hernández [41] realizó estudios preliminares en relación con emisiones de COV en Colombia, en el cual determinó las emisiones de COV generadas por especies vegetales mediante el uso del modelo GloBEIS (Global Biosphere Emission and Interaction System), como primer paso para tener una idea aproximada del orden de magnitud y de la importancia de los aportes de las emisiones biogénicas en ciudades urbanas. Las estimaciones de las emisiones fueron basadas en el modelo de emisiones e interacciones en la biosfera (BEIS, Biosphere Emissions and Interactions System), modelo que adecua una lista de especies vegetales presentes en su dominio y las asocian a especies vegetales definidas en el modelo usando como criterio la pertenencia a la misma familia o presencia de características similares. De la investigación de Hernández [41] se concluye que las emisiones calculadas con el modelo están sobreestimadas con respecto a las emisiones elaboradas previamente para contaminantes en la ciudad de estudio.

Manso *et al.* [42] también se basó en el modelo GLoBEIS para la cuantificación de las emisiones de COVB de plantaciones cítricas, que son terrenos destinados específicamente al cultivo de árboles frutales cítricos, tales como naranjas, limones, toronjas, mandarinas, limas, entre otros. Manso *et al.* [42] realizaron una estimación de las emisiones biogénicas de COV y monóxido de carbono en plantaciones cítricas de Cuba con el fin de relacionar los resultados con el impacto en el sistema atmosférico. Se aplicó el modelo, el cual fue alimentado con datos del índice de área foliar y de la radiación fotosintéticamente activa, así como con otras variables ambientales como; temperatura, nubosidad (cobertura nubosa), humedad, y velocidad del viento. Como principal resultado Manso *et al.* [42] indicaron que las emisiones biogénicas correspondieron casi en su totalidad a las emisiones de COVB (99.1%), siendo las principales las correspondientes a los monoterpenos (40.45%).

Al igual que Manso *et al.* [42] investigaciones preliminares también se han enfocado en evaluar el comportamiento de variables meteorológicas y su influencia en la emisión de COV de origen vegetal, tal es el caso de Viteri [43] que también aplicó modelos matemáticos para estimar la cantidad de estas emisiones en el Ecuador, basándose tanto en factores meteorológicos, biomasa foliar, radiación, uso del suelo, así como en factores e inventario de emisiones de años anteriores. Del estudio se obtuvo que las emisiones totales ascienden a 1855 kilotoneladas anuales, de las cuales al isopreno le corresponden cerca del 69% de las emisiones.

Conclusiones

El uso de diferentes técnicas analíticas para la cuantificación de COVB ha sido fundamental en diversos campos de investigación y aplicaciones prácticas. La aplicación de métodos basados en GC-MS, GC-FID, TD-GC-MS, SIFT-MS y PTR-MS ha sido fundamental para el estudio y cuantificación de compuestos orgánicos volátiles biogénicos. Estas técnicas proporcionan información valiosa sobre la presencia, concentración y estructura química de los COVB, lo que contribuye al avance en campos como la investigación científica, el monitoreo ambiental y la evaluación de riesgos asociados a estos compuestos

Particularmente técnicas como la cromatografía de gases y la espectrometría de masas han demostrado ser eficaces en la identificación y cuantificación precisa estos compuestos. Por lo tanto, la cromatografía de gases, en combinación con la espectrometría de masas (GC-MS), es una técnica ampliamente utilizada en el análisis de COVB, permitiendo la separación de los compuestos en una muestra y su detección precisa y selectiva. La GC-MS proporciona información valiosa sobre la estructura química de los COVB y su presencia en diferentes matrices ambientales. Además, técnicas específicas dentro de la GC-MS, como la desorción térmica-cromatografía de gases-espectrometría de masas (TD-GC-MS) y la GC con detector de ionización de llama (GC-FID), también se utilizan para la cuantificación de COVB en diferentes aplicaciones.

Con respecto a posibles combinaciones de las diferentes técnicas analíticas para la cuantificación de COVB se indica lo siguiente;

- GC-MS: Ampliamente utilizada debido a su capacidad para separar y detectar una amplia gama de COVB en muestras complejas. La cromatografía de gases separa los compuestos y la espectrometría de masas los identifica, proporcionando información sobre la estructura y concentración de los COVB.
- GC-FID: Se utiliza cuando se necesita una cuantificación precisa de los COVB sin necesidad de identificar la estructura química específica. El detector de ionización de llama (FID) es altamente sensible a los COVB y proporciona una respuesta lineal en función de la concentración.

- TD-GC-MS: Especialmente útil en el análisis de muestras sólidas o semisólidas, ya que permite la desorción térmica de los compuestos volátiles antes de su separación y detección mediante GC-MS. Esta técnica es valiosa en el análisis de muestras como suelos, alimentos, productos naturales, entre otros.
- La espectrometría de masas basada en ionización química suave también es recomendada en el análisis de COVB, especialmente en situaciones que requieren una respuesta en tiempo real y la capacidad de detectar compuestos en niveles bajos de concentración
- SIFT-MS: Es una técnica rápida y sensible que permite la identificación y cuantificación en tiempo real de los COVB. Se utiliza ampliamente en aplicaciones como el monitoreo ambiental, la evaluación de la calidad del aire y el control de la calidad en la industria.
- PTR-MS: Es una técnica altamente sensible que utiliza reacciones de transferencia de protones para ionizar los COVB. Es adecuada para el análisis de muestras gaseosas y líquidas, y se utiliza en campos como la investigación atmosférica, la detección de compuestos volátiles en el aliento humano y el control de la calidad en la industria alimentaria.

Indicar finalmente, que la elección de las técnicas analíticas adecuadas para el análisis de COVB depende de los objetivos específicos del estudio, las características de la muestra y la sensibilidad requerida. Las técnicas basadas en GC, como GC-MS, GC-FID y TD-GC-MS, se utilizan para la identificación y cuantificación precisa de COVB en muestras complejas, mientras que la espectrometría de masas basada en ionización química suave, como SIFT-MS y PTR-MS, se utiliza en situaciones que requieren una respuesta en tiempo real y una alta sensibilidad.

Referencias

- [1] A. Guenther, C.Hewitt, D.Erickson, R.Fall, C.Geron, T.Graedel, P. Harely, L.Klinger, M. Lerdau, W. Mackay, T.Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R.Tallamraju, J.Taylor, and P.Zimmerman, "A global model of natural volatile organic compound emissions". *J. Geophys.Res. Atmos.*, 100(D5), 8873–8892 1995. doi:10.1029/94JD02950/abstract.
- [2] J.D.Fuentes, M. Lerdau, R. Atkinson, D. Baldocchi, J.W. Bottenheim, P. Ciccioli, B. Lamb, C. Geron, L. Gu, A. Guenther, D. Sharkey, and W. Stockwell, " Biogenic Hydrocarbons in the Atmospheric Boundary Layer". *A Review, Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 81(7), 1537–1575. 2002. doi:10.1175/1520-0477(2000)081<1537:bhitab>2.3.co;2
- [3] J. Kesselmeier, and M. Staudt, " Biogenic volatile organic compounds (VOC): An overview on emission, physiology and ecology". *J. Atmos. Chem.*, 33(1), 23–88. 1999. doi:10.1023/A:1006127516791
- [4] J. Speight, "Environmental Organic Chemistry for Engineers". 2016.
- [5] A. Guenther, T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P.I. Palmer, and C. Geron, " Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)". *Atmos. Chem. Phys.*, 6(11), 3181–3210.2006. doi:10.5194/acp-6-3181-2006
- [6] T. Sharkey, A. Wiberlet, and A. Donohue, "Isoprene Emission from Plants : Why and How". *Ann. Bot.*, 101, 5–18. 2007. doi:10.1093/aob/mcm240
- [7] D. J Jacob, B. D Field, Q.Li, D. R.Blake, J. de Gouw, C. Warneke, A. Hansel, A. Wisthaler, H. B. Singh, and A. Guenther, " Global budget of methanol: Constraints from atmospheric observations". *J. Geophys. Res. D Atmos.*, 110(8), 1–17.2005. doi:10.1029/2004JD005172
- [8] T. Stavrou, A. Guenther, A. Razavi, L. Clarisse, C. Clerbaux, P.F. Coheur, D. Hurtmans, F. Karagulian, M. DeMazière, C. Vigouroux, C.Amelynck, N. Schoon, Q. Laffineur, B. Heinesch, M. Aubinet, C. Rinsland, and J.F. Müller, "First space-based derivation of the global atmospheric methanol emission fluxes". *Atmos. Chem. Phys.*, 11(10), 4873–4898.2011. doi:10.5194/acp-11-4873-2011
- [9] A. Guenther, " Biological and Chemical Diversity of Biogenic Volatile Organic Emissions into the Atmosphere". *ISRN Atmos. Sci.*, 2013, 1–27.2013. doi:10.1155/2013/786290
- [10] J. Laothawornkitkul, J.E. Taylor, N.D. Paul, and C.N. Hewitt, "Biogenic volatile organic compounds in the Earth system". *Tansley review, New Phytol.*, 183(1), 27–51. 2009. doi:10.1111/j.1469-8137.2009.02859.x, 2009.

- [11] T. Karl, A. Guenther, R.J. Yokelson, J. Greenberg, M. Potosnak, D.R. Blake, and P. Artaxo, "The tropical forest and fire emissions experiment: Emission, chemistry, and transport of biogenic volatile organic compounds in the lower atmosphere over Amazonia". *J. Geophys. es. Atmos.*, 112(18), 1–17.2007. doi:10.1029/2006JD008539.
- [12] de Gouw, Joost and C.Warneke, "Measurements of Volatile Organic Compounds in the earth's atmosphere using Proton- Transfer- reaction Mass Spectrometry, *Mass Spectrom*". *Rev.*, 26, 223–257- 2007. doi:10.1002/mas
- [13] G. König, M. Brunda, H. Puxbaum, C.N. Hewitt, S.C. Duckham, and J. Rudolph," Relative contribution of oxygenated hydrocarbons to the total biogenic VOC emissions of selected mid-European agricultural and natural plant species". *Atmos. Environ.*, 29(8), 861–874. 1995. doi:10.1016/1352-2310(95)00026-U
- [14] S. Bsabies, "Characterization of biogenic volatile organic compounds and their OH reactivity in various agoecosystems". Doctoral thesis. Université De Versailles, Paris, 2019. France. NNT:2016SACLV093
- [15] J. Driscoll, "Gas chromatography in environmental analysis - Aims and challenges". in *Environmental Instrumentation Handbook*, edited by Wiley, 2004, pp. 1–17
- [16] L. K Sahu, "Volatile organic compounds and their measurements in the troposphere". 2012. (12),2012.
- [17] A. Srivastava, and D. Majumdar, "Monitoring and Reportin VOCS in Ambient Air". In book: *Air Quality Monitoring, Assessment and Management*. DOI:[10.5772/16774](https://doi.org/10.5772/16774)
- [18] D. Smith, and P. Španěl, "Selected ion flow tube mass spectrometry (SIFT-MS) for on-line trace gas análisis". *Mass Spectrom. Rev.*, 24(5), 661–700. 2002. doi:10.1002/mas.20033,
- [19] W. Lindinger, A. Hansel, and A. Jordan, "On-line monitoring of volatile organic compounds at pptv levels by means of Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry (PTR-MS) Medical applications, food control and environmental research". *Int. J. Mass Spectrom. Ion Process.* 173(3)-1998. 191–241
- [20] R.S. Blake, P.S Monks, and A.M Ellis, " Proton-transfer reaction mass spectrometry", *Chem. Rev.*, 109(3), 861–896. 2009. doi:10.1021/cr800364q.
- [21] A.M. Ellis, C.A. Mayhew, "Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry: Principles and Applications". Wiley., 2014.
- [22] C.E. Jones, S. Kato, Y. Nakashima, and Y. Kajii,"A novel fast gas chromatography method for higher time resolution measurements of speciated monoterpenes in air". *Atmos. Meas. Tech.*, 7(5), 1259–1275. 2014. doi:10.5194/amt-7-1259-2014.
- [23] E. Pallozzi, G. Guidolotti, P. Ciccioli, F. Brilli, S. Feil, and C. Calfapietra, " Does the novel fast-GC coupled with PTR-TOF-MS allow a significant advancement in detecting VOC emissions from plants?". *Agric. For. Meteorol.*, 216, 232–240. 2016. doi:10.1016/j.agrformet.2015.10.016.
- [24] A. Romano, L. Fischer, J. Herbig, H. Campbell-Sills, J. Coulon, P. Lucas, L. Cappellin, L. and F. Biasioli, "Wine analysis by FastGC proton-transfer reaction-time-of-flight-mass spectrometry". *Int. J. Mass Spectrom.*, 369, 81–86. 2014. doi:10.1016/j.ijms.2014.06.006.
- [25] A. Kännaste, L. Copolovic, Ü. Niinemets, "Gas Chromatography–Mass Spectrometry Method for Determination of Biogenic Volatile Organic Compounds Emitted by Plants". Manuel Rodríguez-Concepción (ed.), *Plant Isoprenoids: Methods and Protocols*, Methods in Molecular Biology, vol. 1153. 2014. DOI 10.1007/978-1-4939-0606-2_11.
- [26] Alcaraz, et al, "Monitoring Biogenic Volatile Compounds Emitted by Eucalyptus citriodora Using SPME", *Anal. Chem.* 2001, 73, 4729-4735. DOI: 10.1021/ac0103219.
- [27] González et al, "Extraction and Identification of Volatile Organic Compounds in Scentless Flowers of 14 Tillandsia Species Using HS-SPME/GC-MS". *Metabolites* 2022, 12, 628. <https://doi.org/10.3390/metabo12070628>
- [28] Fajardo et al, "Estimación de las emisiones biogénicas urbanas en Bogotá de compuestos orgánicos volátiles. Caso de estudio especie Eucalyptus globulus Labill". *Gestión y Ambiente* 24(2),93916, 2021, DOI: <https://doi.org/10.15446/ga.v24n2.93916>
- [29] Castorina, et al, "Characterization of the biogenic volatile organic compounds (BVOCs) and analysis of the PRQ1 molecular marker in *Vitis viner* L. Inoculated with the Nematode *Xiphinema index*". *International Journal of Molecular Sciences*, *Int. J. Mol. Sci.* 21, 4485.2020. doi:10.3390/ijms21124485.
- [30] K.Wouter, and R. Pierik, " Biogenic volatile organic compounds and plant competition, see front matter". Elsevier Ltd. All rights reserved.2009. doi:10.1016/j.tplants.2009.11.00
- [31] Kesselmeir et al, " Natural volatile organic compound emissions from plants and their roles in oxidant balance and particle formation". *Amazonia and Global Change Geophysical Monograph Series 186* Copyright by the American Geophysical Union. 2009. DOI: 10.1029/2008GM000717

- [32] M. Zhaobin, "Volatile organic compounds (VOCs) in plants and soils of Mediterranean ecosystems". 2021. Doctoral Thesis, Universidad Autónoma de Barcelona, Spain.
- [33] Lin *et al*, "Characteristics and chemical reactivity of biogenic volatile organic compounds from dominant forest species in the Jing-Jin-Ji area, China". *Forest Ecosystems*, 8:52, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00322-y>
- [34] Aydin *et al*, " Biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from forested areas in Turkey: Determination of specific emission rates for thirty-one tree species". *Science of the Total Environment* 490 (2014) 239–253
- [35] A. Corada, "Estudio de compuestos orgánicos volátiles biogénicos de especies arbóreas: Crecimiento de incidencia en la química troposférica". 2012, Doctoral Thesis, Universidad de Chile.
- [36] H. Peralta, "Contribución a las estrategias de descontaminación atmosférica, considerando el aporte de Compuestos Orgánicos Volátiles Biogénicos emitidos por especies arbóreas nativas en la Región Metropolitana". 2009. Tesis de doctorado, Universidad de Chile.
- [37] Valencia *et al*, "Biogenic VOCs emission profiles associated with plant-pest-interaction for phenotyping applications". *Sensors*, 22, 4870. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22134870>.
- [38] F. Limochini, "Análisis de emisiones de compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico(BVOCs) en bosque tropical amazónico". 2010. Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú
- [39] X. Pang, X, "Biogenic volatile organic compound analyses by PTR-TOF-MS: Calibration, humidity effect and reduced electric field dependency". *Journal of Environmental Sciences*, 32, 196–206. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2015.01.013>.
- [40] M,P Vermuel, "Observations of biogenic volatile organic compounds over a mixed temperate forest during the summer to autumn transition". *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 4123–4148, 2023, <https://doi.org/10.5194/acp-23-4123-2023>
- [41] D. Hernandez, "Inventario de emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación en Cundinamarca y Bogotá" 2005. Tesis de Grado, Universidad de los Andes.
- [42] R. Manso, "Estimación de emisiones biogénicas de componentes orgánicos volátiles y monóxido de carbono en plantaciones cítricas de Cuba". *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 27, No. 3, Julio-Septiembre 2021, ISSN: 2664-0880, <http://rcm.insmet.cu>.
- [43] M.Viteri, "Estimación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación del Ecuador durante el año 2010". 2012. Tesis de Grado. Universidad San Francisco de Quito.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *ChatGPT*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.

Además, utilizamos la herramienta de inteligencia artificial *ChatGPT* para traducir textos de este artículo. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.

Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para vehículos en Costa Rica, 2014¹

Comparison of two methodologies for calculating greenhouse gas emissions for vehicles in Costa Rica, 2014







Priscila Picado-Valenzuela², Javier E. Rodríguez-Yáñez³, José Pablo Sibaja-Brenes⁴

Fecha de recepción: 30 de octubre, 2023
Fecha de aprobación: 17 de febrero, 2024

Picado-Valenzuela, P; Rodríguez-Yáñez, J. E; Sibaja-Brenes, J. P. Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para vehículos en Costa Rica, 2014. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 89-99.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6921>



- 1 Artículo basado en tesis de maestría https://uned.cr/ecologiaurbana/images/pdf/Tesis_de_Priscila_Picado.pdf
- 2 Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales, Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica.
 ppicado@icloud.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5676-2723>
- 3 Universidad Estatal a Distancia, Vicerrectoría de Investigación. Costa Rica
 jrodriguezy@uned.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5539-3153>
- 4 Universidad Nacional, Escuela de Química, Laboratorio de Química de la Atmósfera. Costa Rica.
 jose.sibaja.brenes@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>

Palabras clave

Factores de emisión; inventario; transporte; modelado; automotores.

Resumen

Contar con métodos confiables para estimar las emisiones antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es de vital importancia para diseñar estrategias eficientes para mitigar los efectos del cambio climático. Uno de estos métodos es el software MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator*) diseñado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA). Otra metodología es la implementada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica, la cual se basa en las directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). El objetivo de este trabajo es determinar la factibilidad de utilizar MOVES en el contexto costarricense para la obtención de factores locales que mejoren las estimaciones de emisiones de GEI para fuentes móviles vehiculares en Costa Rica en el 2014. Para esto se evaluaron dos escenarios de emisiones estimadas de GEI calculados mediante el software de modelado MOVES y la metodología de cálculo implementada por el IMN. Para esto se recopiló información de diferentes fuentes oficiales para suplir de datos a ambas metodologías y realizar el análisis. Asimismo, se realizó una comparación cuantitativa con una escala Likert para determinar la confiabilidad de los dos métodos. Como resultados se determinó que MOVES calcula valores de emisión de GEI más altos que la metodología del IMN. Relacionado con esto, el análisis con las categorías Likert demostró que la confiabilidad de los datos de la metodología MOVES para Costa Rica es menor que los utilizados por el IMN. En conclusión la metodología de cálculo de emisiones de GEI por MOVES y por el IMN brindan un rango superior e inferior al cálculo de emisiones de GEI. Asimismo, ambas metodologías plantean aproximaciones complementarias al estudio de las emisiones de GEI.

Keywords

Emission factors; inventory; transport; modeling; automobiles.

Abstract

Having reliable methods to estimate anthropogenic emissions of Greenhouse Gases (GHG) is of vital importance to design efficient strategies to mitigate the effects of climate change. One of these methods is the MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) software designed by the United States Environmental Protection Agency (EPA). Another methodology is the one implemented by the National Meteorological Institute (NMI) of Costa Rica, which is based on the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The objective of this paper is to determine the feasibility of using MOVES in the Costa Rican context to obtain local factors that improve GHG emission estimates for vehicular mobile sources in Costa Rica in 2014. For these there were evaluated two scenarios of estimated GHG emissions calculated using the MOVES modeling software and the calculation methodology implemented by the NMI. Information was collected from different official sources to supply data to both methodologies and perform the analysis. Likewise, a quantitative comparison was made with a Likert scale to determine the reliability of the two methods. As a result, MOVES calculate higher GHG emission values than the IMN methodology. The analysis with the Likert scale showed that the reliability of the data used for MOVES methodology for Costa Rica is lower than that data used by the IMN. In conclusion, the methodology for calculating GHG emissions by MOVES and by the IMN provide an upper and lower range for the calculation of GHG emissions. Likewise, both methodologies propose complementary approaches to the study of GHG emissions.

Introducción

El cambio climático es la crisis más importante de nuestra era [1]. Se estima que para el 2030 la temperatura promedio global podría llegar a aumentar 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales[2]. Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), un aumento de 2 °C pone en riesgo la supervivencia de un sinnúmero de especies en el planeta, entre ellas la especie humana [3]. De las distintas formas de emisiones que se dan en el planeta, las emisiones antropogénicas producidas por el transporte aportaron un 14 % de las emisiones globales de Gases Efecto Invernadero (GEI) para el 2010 [4], donde los GEI más comunes son dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Las directrices del IPCC (2006) sugieren un potencial de calentamiento global (PCG) de 1 para CO_2 , 21 para CH_4 y 310 para N_2O , generando su correspondencia en CO_2 equivalente.

Las emisiones de los GEI procedentes de fuentes móviles se clasifican según el tipo de transporte: terrestre por carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo y fluvial [5]. En la actualidad, los vehículos en carretera son la principal fuente de GEI del sector transporte, estos aportan cerca de un 25 % del total de las emisiones de CO_2 [6]. Los vehículos que circulan por carretera pueden ser automóviles, motocicletas, vehículos de carga liviana, camiones de carga pesada, tractores, grúas y autobuses[5]. Recientemente, se han desarrollado herramientas de modelación para cuantificar las emisiones de GEI [6]. Estos modelos utilizan algoritmos para representar la realidad y establecer causalidad entre un conjunto de parámetros y la emisión de GEI [7]. En otras palabras, se ha definido la emisión como una variable dependiente vinculada con otros factores tales como lo son el combustible utilizado o la velocidad del movimiento realizado o el tipo de vehículo; donde uno o varios de los factores afectan la variación de estas emisiones [8]. Para esto, se toman datos del parque vehicular (cantidad y tipo de vehículos), de su nivel de actividad (kilómetros recorridos, consumo de combustible) y de factores locales (p.ej., humedad relativa, tipo de carretera), a fin de determinar los factores de emisión y/o estimar las emisiones de GEI [9].

Las metodologías para estimar emisiones de GEI varían según el grado de complejidad y el nivel de detalle de los datos que requieren. Metodologías como las *Tier 1* (Nivel 1) son las más simples, las del tipo *Tier 2* (Nivel 2) son intermedias y las *Tier 3* (Nivel 3) son las más complejas y necesitan de datos muy específicos [5]. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés) desarrolló el software MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator* – Simulador de Emisiones de Vehículos Motorizados) para estimar las emisiones de GEI provenientes de vehículos en carretera [4]. MOVES es una metodología nivel *Tier 3* e integra las herramientas, los algoritmos, los datos y los conocimientos necesarios para realizar análisis de emisiones de fuentes vehiculares asociados al desarrollo de regulaciones, normas, inventarios y proyecciones [10]. A nivel mundial, las directrices del IPCC para la elaboración de Inventarios Nacionales de GEI son el estándar para el cálculo y el reporte de emisiones [11 y 12]. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) utiliza una metodología Tier 2 simplificada para los Inventarios de GEI de Costa Rica (INGEI-CR), donde los factores de emisión se expresan en función del tipo combustible y el tipo de tecnología de control de la contaminación (con o sin control), sin asociarlo con el tipo de vehículos [13]. Loría Salazar (2014) indica que la flota vehicular del 2014 estaba conformada por 73,4 % de automóviles particulares y de carga liviana, un 20,6 % de motocicletas, un 2,7 % de vehículos de carga pesada, un 2,1 % de autobuses y taxis y un 1,2 % de otros equipos. El 83 % vehículos con motor de gasolina (1 160 897 unidades) y 17 % con motores diésel (238 186 unidades) [14]. En el 2014 el transporte contribuyó con un 75 % de las emisiones del sector, de las cuales el 95 % correspondieron al transporte terrestre. Los mayores responsables de estas emisiones son los vehículos particulares (48 %), seguidos por los camiones de servicio pesado y autobuses (27 %) y carga liviana con un (21 %). Estas fuentes emiten; entre otros contaminantes, 4 532,41 Gg de CO_2 , 1,187 Gg de CH_4 y 0,314 Gg

de N_2O [14]. Esta cantidad de vehículos emiten una serie de GEI que significan un importante aporte a huella de carbono de Costa Rica y afecta en la calidad de aire, sobre todo del Gran Área Metropolitana (GAM) [15].

Materiales y métodos

se ejecutó una comparación cuantitativa de dos metodologías para determinar su confiabilidad y aplicabilidad para el contexto costarricense. Se recopilaron datos meteorológicos y de características técnicas del parque vehicular para estimar las emisiones de GEI generadas por las fuentes automotores que circularon en carretera en Costa Rica durante el 2014. La recolección de los datos consideró todos los días de la semana y en todos los horarios, para todo el territorio del país. Para los análisis con el software MOVES [9] y la metodología utilizada por el IMN [16] se utilizan variables diferenciadas (cuadro 1).

Cuadro 1. Lista de variables utilizadas para la estimación de GEI emitidos por el parque vehicular para el 2014 con el software MOVES y con la metodología del IMN.

MOVES	IMN
Parámetros meteorológicos.	Consumo de combustible (L).
Parámetros vehiculares técnicos.	Factor de emisión de los gases contaminantes.
Parámetros fisicoquímicos del combustible y consumo.	Potencial de Calentamiento Global de los gases.
Parámetros de circulación de los vehículos.	
Procesos de emisión.	

Estimación de GEI con MOVES

MOVES utiliza un sistema de manejo de base de datos con relaciones MYSQL para el ordenamiento de los datos. Los parámetros para el análisis fueron:

1. Parámetros meteorológicos

Aportados por el IMN y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), de las estaciones meteorológicas automáticas distribuidas a lo largo de Costa Rica. Se recolectó la temperatura horaria promedio, la Humedad relativa promedio y la Presión barométrica (se asumió una presión barométrica a baja altura de 29,8 in Hg debido a que la mayoría de las carreteras de circulación están a menos de 1 680 m s.n.m.).

2. Parámetros vehiculares técnicos

Se clasificaron los datos vehiculares según el año del modelo, el tipo de vehículo y el combustible, con una antigüedad máxima de 30 años (de 1984 al 2014, los vehículos anteriores a 1984 se incluyen en ese año). Se obtuvo estos datos del registro del pago del impuesto de circulación del Instituto Nacional de Seguros (INS) en el 2015 [30].

3. Parámetros fisicoquímicos del combustible y consumo

Los combustibles considerados fueron gasolina (regular y super) y diésel y los datos fueron aportados por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). No se tomaron en cuenta los datos de vehículos cuyo combustible es Gas Licuado de Petróleo (GLP), debido a

la reducida información disponible. Tampoco se consideraron combustibles como etanol y gas natural. Los valores de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles se promediaron según el consumo de cada uno y los brindó la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

4. Parámetros de circulación de los vehículos

A. Tipos de ruta: Se clasificaron las carreteras de la Red Vial Nacional en rutas primarias, secundarias y terciarias. Además, se reclasificaron dichas categorías como rural y urbana. Los datos fueron obtenidos del Ministerio de Obras Públicas y Transporte [17]. B. Distancia recorrida por cada una de las categorías vehiculares: como medida de distancia recorrida se utilizó el valor promedio de las lecturas de los tacómetros de cada categoría vehicular. Estos datos se recopilaron a partir de las inspecciones periódicas realizadas por Revisión Técnica Vehicular (RTV) durante el 2016 y el anuario de información del MOPT [17]. C. Velocidad promedio de circulación por categoría vehicular y por tipo de ruta. Se obtuvo esta información de datos recolectados de las estaciones de conteo de tránsito del MOPT a través de la Dirección de Cambio Climático.

5. Procesos de emisión

Se contabilizaron las emisiones al momento del arranque y durante la circulación por carretera. Se ingresaron todos los parámetros en el programa MOVES y se estimaron las emisiones totales en toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂eq) y el factor de emisión promedio (en g/km) de tres GEI: CO₂, CH₄ y N₂O. Se calcularon dichos GEI según el tipo de combustible, tipo de vehículo y por año del modelo.

Estimación de GEI según el IMN

Se estimó el cálculo de las emisiones de GEI para el parque vehicular [16] con:

$$T \text{ CO}_2 \text{ eq} = (L_{\text{comb}} \times FE_{\text{CH}_4} \times 21 + L_{\text{comb}} \times FE_{\text{CO}_2} \times 1 + L_{\text{comb}} \times FE_{\text{N}_2\text{O}} \times 310) / 1000$$

donde T CO₂ eq son las toneladas de CO₂ equivalente, L_{comb} es la cantidad de combustible (gasolina o diésel) en litros, FE_{gas} es el factor de emisión del GEI (cuadro 2) [5].

Cuadro 2. Factores de emisión de GEI utilizados por el IMN para fuentes móviles [18].

Combustible	GEI		
	CO ₂ (kg/L)	CH ₄ (g/L)	N ₂ O (g/L)
Gasolina (sin catalizador)	2,231	1,176	0,116
Gasolina (con catalizador)		0,907	0,283
Diésel	2,613	0,149	0,154

Los datos correspondientes al consumo de combustible se obtuvieron del portal de datos abiertos de la Refinadora Costarricense de Petróleo [19] y del Balance Energético para el 2014 elaborado por la Secretaría de Planificación del Subsector Energía [20]. Se utilizaron los factores de emisión de GEI publicados por el IMN para el 2021. La elección del factor de emisión se determinó según la tecnología del vehículo con o sin catalizador. Para vehículos anteriores a 1990 se asumió que no tenían catalizador, mientras que para vehículos posteriores

a 1991 se tomó en cuenta que sí tenían catalizador. Esto debido a que la Normativa EURO 0 para Estándares de Emisión determinó la obligatoriedad de la presencia del catalizador en la manufactura de vehículos a partir de 1991 [21].

Comparación de las estimaciones de GEI calculadas con MOVES y según el IMN

Se realizó una comparación cuantitativa tipo Likert [22] de las dos metodologías de estimación de GEI. Para esto, se aplicó una escala Likert adaptada por [23] a gases contaminantes tóxicos. Se definieron cinco rangos, que abarcaron desde parámetros con alta precisión, exactitud y el alcance adecuado, hasta parámetros con datos insuficientes (Tabla 3). Se definieron estos rangos con valores entre cero a uno y se utilizó la siguiente fórmula para estimar la confiabilidad total de los parámetros:

donde $n_{\text{categoría}}$ es el número de parámetros en cada categoría Likert, valor categoría Likert según corresponda (cuadro 3) y $n_{\text{metodología}}$ es el total de parámetros utilizados en cada metodología. Valores de confiabilidad más cercanos a uno indican mayor confiabilidad, valores más cercanos a cero indican baja confiabilidad.

Cuadro 3. Escala de calificación de la confiabilidad de los datos, categorías Likert

Rangos	Criterios
0,8	Basados en datos exhaustivos específicos para Costa Rica
0,6	Basado en datos limitados o extrapolados específicos para Costa Rica
0,4	Basado en el discernimiento de expertos
0,2	Basado en factores globales o externos
0,0	Datos insuficientes

Resultados

Factores de emisión estimados por MOVES

Con el software MOVES se calcularon los factores de emisión para cada categoría vehicular. Se estimó que los autobuses tienen el factor de emisión de CO₂ más alto, seguido por los vehículos de pasajeros que utilizan gasolina y los vehículos de carga pesada (cuadro 4). Esto puede estar asociado a que los autobuses del parque vehicular son relativamente antiguos con respecto a los vehículos de otras categorías. También, se consideraron los kilómetros recorridos por cada tipo de vehículo. En este sentido, los autobuses, son los que presentan un valor mayor, en comparación con los otros los otros vehículos, lo que también afecta su emisión total [24]. Los vehículos de pasajero que utilizan diésel tienen el factor de emisión de CO₂ más bajo, lo que se relaciona con la cantidad de vehículos en el parque vehicular [17, 18]. Por otro lado, los factores de emisión de CH₄ y N₂O fueron más altos para vehículos de pasajeros y de carga liviana de gasolina. En contraposición, los vehículos de pasajero y de carga liviana de diésel tienen los factores de emisión de CH₄ y N₂O más bajo. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que el factor de calentamiento global de estos gases es mayor. Por lo que el aporte de estas emisiones es considerable.

Cuadro 4. Factores de emisión con MOVES para el parque vehicular en el 2014.

Categoría vehicular	Combustible	Factor de emisión (g/km)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Motocicleta	Gasolina	54,76	5,24x10 ⁻³	3,91x10 ⁻⁴
Vehículo de pasajeros	Gasolina	235,39	1,85x10 ⁻²	1,54x10 ⁻²
	Diésel	32,06	6,32x10 ⁻⁶	2,22x10 ⁻⁶
Carga liviana	Gasolina	101,38	6,29x10 ⁻³	5,22x10 ⁻³
	Diésel	37,09	2,82x10 ⁻⁵	1,74x10 ⁻⁵
Autobús	Diésel	476,14	1,39x10 ⁻³	8,11x10 ⁻⁴
Carga pesada	Diésel	227,19	7,34x10 ⁻⁴	4,94x10 ⁻⁴

Resumen de emisiones por cada método

Con el software MOVES se estimó que, en Costa Rica se produjeron un total de 6 245,81 Gg CO₂eq. De este total, un 55 % de las emisiones de CO₂eq corresponden a gasolina, donde el CO₂ representa en ambos combustibles más del 95 % de las emisiones. Las emisiones de CH₄ son mayores que las de N₂O en cada combustible, pero los valores de CO₂ eq son mayores para el N₂O (cuadro 5). Con la metodología del IMN se estimó que, en Costa Rica, se produjeron un total de 4 912,44 Gg CO₂eq. De este total, un 51 % de las emisiones de CO₂eq corresponden a gasolina, de la misma forma que en el MOVES, los porcentajes de emisión y las tendencias se mantienen.

Cuadro 5. Emisiones estimadas para cada GEI con el software MOVES y con la metodología del IMN en Costa Rica para el 2014.

Metodología	Combustible	GEI (Gg)			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
MOVES	Gasolina	3 367,81	0,99	0,15	3 433,49
	Diésel	2 778,47	0,14	0,10	2 812,33
	Total				6 245,81
IMN	Gasolina	2 438,26	1,14	0,11	2 496,30
	Diésel	2 374,76	0,13	0,13	2 416,14
	Total				4 912,44
Relación (MOVES/IMN)	Gasolina	1,38	0,87	1,32	1,38
	Diésel	1,17	1,09	0,80	1,17
	Total				1,27

Comparación de las estimaciones de GEI calculadas con MOVES y según el IMN

La estimación de CO₂eq con MOVES es en términos generales un 27 % superior al valor calculado por el método del IMN. Las emisiones globales de CO₂ son mayores por MOVES en un 28 %, en tanto que para CH₄ son menores en un 10 %, mientras que las de N₂O resultan similares.

En relación con los combustibles las emisiones de gasolina son mayores que las de diésel en casi todos los parámetros. Los vehículos de gasolina aportan alrededor del 55 % en MOVES y 51 % en IMN. Esto está asociado con la estructura del parque vehicular donde la cantidad de

vehículos a gasolina es mayor. En cuanto a las emisiones calculadas por cada GEI según tipo de combustible, se observa que MOVES presenta valores mayores que el IMN para CO_2 y N_2O en gasolina, y para CO_2 y CH_4 en diésel.

Confiabilidad de los datos

Según el índice de confiabilidad de los datos con la escala Likert, los valores obtenidos para la metodología del IMN son más confiables (valor 0,70; buena confiabilidad), que los obtenidos para el software MOVES (valor 0,56; leve confiabilidad). El método aplicado por el IMN requiere pocos datos, con información disponible. Por el contrario, MOVES requiere más parámetros para su funcionamiento, los cuales tienen un alcance limitado y/o son valores extrapolados para Costa Rica. En caso del método MOVES los parámetros meteorológicos, así como los de tipo de vehículo y las características del combustible, son insumos exhaustivos y específicos para Costa Rica. Por el contrario, los parámetros de circulación de vehículos y de consumo de combustible por tipo de vehículos son menos confiables, ya que son extrapolaciones. Por otro lado, no se cuenta con datos de procesos de emisión y otros parámetros como tiempo reposo y arranque. Para la metodología del IMN, los datos de consumo de combustible son óptimos para realizar las estimaciones de emisión de GEI, mientras que los factores de emisión de GEI son de menor precisión y exactitud, ya que provienen de datos extrapolados para Costa Rica.

Discusión

En el análisis general se encontró que el patrón de emisión de GEI en ambos métodos es similar ($\text{CO}_2 \gg \text{CH}_4 > \text{N}_2\text{O}$) y concuerda con lo indicado por el IPCC en la mayoría de los países, en relación con su parque vehicular [3]. De la misma forma, esta tendencia de emisión para vehículos por carretera concuerda con los resultados del INGEI costarricense y la aplicación de otros métodos de modelado de emisiones a nivel global [18, 26, 27]. MOVES estimó emisiones totales de GEI en CO_2eq un 27 % superiores a lo estimado con el método del IMN (Tabla 5). Otros estudios, en los que se compara MOVES con otros softwares de modelación, han encontrado una tendencia similar, donde MOVES estima un valor de emisión superior al método de comparación [25, 26, 27, 28]. La causa más probable de esta diferencia es que MOVES requiere de datos a nivel *Tier 3* [7, 10], los cuales son más complejos y altamente específicos [6, 28]. Adicionalmente, en la utilización de MOVES, se recomienda hacer un ajuste para el parque vehicular fuera de Estados Unidos. Por ejemplo, las motocicletas en Estados Unidos tienen una potencia de motor de 10 HP a 15 HP mientras que, en Latinoamérica, los rangos de potencia media están entre los 6,5 HP y 10 HP. También, Liu et al. (2013) sugieren realizar el cálculo de un factor de deterioro de la flota vehicular para que las categorías vehiculares sean comparables. Finalmente, la utilización de MOVES tiene una aplicabilidad limitada a sistemas y lugares con baja disponibilidad de datos para la mayoría de los parámetros [29]. El índice de confiabilidad de datos para MOVES, aplicando la escala Likert, fue bajo debido a las extrapolaciones. Aun así, es necesario resaltar el valor agregado de esta metodología en la obtención de los factores de emisión asociados a cada tipo de vehículo, lo que permite una posible valoración posterior específica para cada categoría vehicular. El cuadro 6 muestra las ventajas y las desventajas de los modelos utilizados.

Cuadro 6. Ventajas y desventajas de las dos metodologías de estimación de GEI.

Modelo	Ventajas	Desventajas
MOVES	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite caracterizar la emisión de GEI. 2. Genera factores de emisión específicos para el sistema de estudio. 3. Permite identificar el impacto de la aplicación de políticas públicas, tránsito, tecnología de motores en las emisiones de GEI. 4. Es aplicable a diferentes escalas (país, municipio, proyecto). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requiere personal capacitado en manejo de base de datos. 2. Es necesario ajustar algunos parámetros (p.ej., características del parque vehicular) al contexto fuera de los EE. UU. 3. Limitado a sistemas que tengan disponibilidad de datos de la mayoría de los parámetros.
IMN	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amplio registro histórico, lo que facilita estudios comparativos temporales, entre sectores y entre países. 2. Es fácil de entender debido a que requiere de pocos parámetros para su implementación. 3. Fácil de aplicar y los datos son accesibles. 4. Metodología conocida por expertos y personal no especializado. 5. No requiere de conocimiento previo en manejo de bases de datos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No permite caracterizar la emisión de GEI. 2. Utiliza factores de emisión globales o nacionales, mas no específicos por categoría vehicular. 3. La exactitud del cálculo de emisión de GEI tiene espacio para mejora.

En cuanto al método aplicado por el IMN, este ha utilizado el mismo para el reporte del INGEI de varios sectores desde 1990 [16]. Esto permite que las estimaciones se puedan comparar con años anteriores y entre sectores. Por otro lado, este método también es utilizado por los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), lo que permite la comparación entre regiones y países [3, 17]. La fórmula que utiliza el IMN requiere de datos que son fáciles de adquirir, confiables y no es necesario que la persona usuaria sea experta con el manejo de bases de datos. En contraposición con el MOVES, el método aplicado por el IMN no permite desagregar la emisión de GEI por tipo de vehículo, lo cual limita el tipo de comparaciones que se pueden realizar. Para una mejor eficiencia de MOVES se recomienda realizar esfuerzos para tener mayor disponibilidad de datos de nivel *Tier 3*. Sin embargo, esto implica una inversión económica alta y un trabajo interinstitucional más eficiente, por lo que la relación costo/beneficio probablemente sea baja.

Conclusiones y recomendaciones

Ambas metodologías presentaron aproximaciones complementarias al estudio de las emisiones de GEI para fuentes vehiculares móviles. Por un lado, MOVES permite un análisis más detallado con respecto a los factores de emisión e identifica como influyen los parámetros del parque vehicular y de conducción, en el valor de las emisiones. Mientras que el método del IMN, aunque es más simple, permite comparaciones históricas e intersectoriales [3, 12, 19, 27]. La aplicación del software MOVES, para el contexto costarricense, es posible, sin embargo, es necesario una labor previa de generación de información con mayor nivel de detalle y la estandarización de bases de datos. Estos esfuerzos contribuirían a mejorar la métrica de emisiones del sector transporte terrestre del país. Adicionalmente, permitirá dar seguimiento, evaluar y proponer escenarios para considerar propuestas de mitigación. El MOVES también genera un aporte a los esfuerzos de transparencia y mejora continua de los INGEI, así como otros esfuerzos país

asociados con la mitigación y la adaptación al cambio climático, como lo son el Programa País para la Carbono Neutralidad, el Plan Nacional de Descarbonización y la Política Nacional de Adaptación [16].

Agradecimientos

A la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía (DCC-MINAE), por el apoyo ante las instituciones públicas para la solicitud de la información requerida, como: Dirección Sectorial de Energía, Instituto Meteorológico Nacional, Refinadora Costarricense de Petróleo, Instituto Costarricense de Electricidad, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Nacional de Seguros, Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, y Riteve SyC. Además, al Colaboratorio Nacional de Computación Avanzada del Centro Nacional de Alta Tecnología (CNCA-CeNAT) en la asesoría en la aplicación del modelo MOVES y la utilización de su clúster para la corrida. Este trabajo tuvo el apoyo del Fondo Especial para la Educación Superior Pública (FEES) y de las Beca CENAT.

Referencias

- [1] von Stechow, C., McCollum, D., Riahi, K., Minx, J. C., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Jewell, J., Robledo-Abad, C., Hertwich, E., Tavoni, M., Mirasgedis, S., Lah, O., Roy, J., Mulugetta, Y., Dubash, N. K., Bollen, J., Ürge-Vorsatz, D., & Edenhofer, O. (2015). Integrating Global Climate Change Mitigation Goals with Other Sustainability Objectives: A Synthesis. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 363–394. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021113-095626>
- [2] World Economic Forum. (2022). *The Global Risks Report 2022 17th Edition*.
- [3] IPCC. (2022). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. In V. Masson-Delmotte & P. Zhai (Eds.), *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- [4] IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 Mitigación del cambio climático Resumen para responsables de políticas*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es-1.pdf
- [5] IPCC. (2006). Chapter 3: Mobile Combustion. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2, 1–78
- [6] Edelenbosch, O. Y., McCollum, D. L., van Vuuren, D. P., Bertram, C., Carrara, S., Daly, H., Fujimori, S., Kitous, A., Kyle, P., Ó Broin, E., Karkatsoulis, P., & Sano, F. (2017). Decomposing passenger transport futures: Comparing results of global integrated assessment models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.003>
- [7] Reynolds, A. W., & Broderick, B. M. (2002). Development of an emissions inventory model for mobile sources. *Transportation Research Part D* 5, 5(2), 77–101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(99)00025-5)
- [8] Zhang, K., Lei, Y., & Guofang, L. I. (2013). Factors affecting vehicular emissions and emission model. *Fourth International Conference on Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- [9] United States Environment Protection Agency (2012). *Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES): User Guide Version, MOVES2010b*. <https://www.epa.gov/moves>
- [10] Tolvett, S., Osses, M., & Lents, J. M. (2009). Análisis de emisiones en ruta de vehículos diésel en Ciudad de México, Santiago y São Paulo, Tesis de Maestría en Ingeniería, 177–181, Universidad de Chile, Santiago, Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102234>
- [11] Vicuña, S. (2014). *Inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero: Un análisis para Chile, El Salvador, México y el Uruguay*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), repositorio. cepal.org/handle/11362/37624
- [12] Alcaldía Mayor de Bogotá (2009). *Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá – Parte 2, inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles* https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3437

- [13] Loría Salazar, L. G. (2014). Vigésimoprimer informe estado de la nación en desarrollo humano sostenible (2014). Informe Final. Implicaciones en infraestructura y transporte, <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/892>
- [14] Ministerio del Ambiente y Energía. (2019). Costa Rica 2019: Inventario Nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono 2015, <https://cambioclimatico.go.cr/inventario-nacional-de-gases-de-efecto-invernadero-ingei/>
- [15] Steinvorth Álvarez, A. (2016). Mejoras en la calidad de aire mediante la reducción de emisiones vehiculares de carbono negro en Costa Rica. *Éxito Empresarial*, 303, 1–4.
- [16] Ministerio del Ambiente y Energía. (2021). Costa Rica 2021: Cuarta Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/cuarta-comunicacionnacional/>
- [17] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2015). Anuario estadístico del sector transporte e infraestructura 2014. <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/164/388.1-1.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [18] Instituto Meteorológico Nacional. (2021). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-decima-edicion-2021/>
- [19] Refinadora Costarricense de Petróleo. (2017). Ventas de productos. <https://datosabiertos.recope.go.cr/conjunto/ventas>
- [20] Secretaría de Planificación del Subsector Energía. (2018). Balance Energético Nacional 2014. <http://www.sinamecc.go.cr/datos-abiertos/bne>
- [21] Hooftman, N., Messagie, M., van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2018). A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86, 1–21, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.012>
- [22] Cremades, L. v., & Rincón, G. (2011). Valoración cualitativa de la calidad de un inventario de emisiones industriales para el modelado de dispersión de contaminantes en la costa nororiental de Venezuela. *Interciencia*, 36(2), 128–134.
- [23] Rodríguez-Yáñez, J. E. (2018). Estimación cualitativa de la incertidumbre para el inventario de contaminantes tóxicos del aire del gran área metropolitana en el 2007. *Repertorio Científico*, 21(2), 15–22. DOI: <https://doi.org/10.22458/rc.v21i2.2406>
- [24] Schipper, L., Deakin, E., McAndrews, C. (2011). Carbon Dioxide Emissions from Urban Road Transport in Latin America: CO2 Reduction as a Co-Benefit of Transport Strategies. In: Rothengatter, W., Hayashi, Y., Schade, W. (eds) *Transport Moving to Climate Intelligence. Transportation Research, Economics and Policy*. Springer, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7643-7_8
- [25] Zhang, T. C., & Surampalli, R. Y. (2013). *Climate Change Modeling, Mitigation, and Adaptation*, Capítulo 5: Impact of Greenhouse Gas Emissions and Climate Change, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- [26] Bai, S., Eisinger, D., & Niemeier, D. (2009). MOVES vs. EMFAC: A Comparison of Greenhouse Gas Emissions Using Los Angeles County, Transportation Research Board 2009 Annual Meeting, <https://www.researchgate.net/publication/228646270>
- [27] Zhao, J., Yun, M., Chen, Z., & Mo, H. (2014). The method for determining vehicle's fuel consumption and exhaust emissions under different traffic conditions, Conference: 14th COTA International Conference of Transportation Professionals, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- [28] Liu, H., Wei, H., & Yao, Z. (2014). Validating MOVES PM2.5 Emission Factor Empirically by Considering Accumulative Emission Effect. 14th COTA International Conference of Transportation Professionals, 3017–3028.
- [29] Al-Ghandour, M. (2014). Analysis of Fuel Consumption and Emissions at Roundabout with Slip Lane, Using SIDRA and Validation by MOVES Simulation, Second Transportation & Development Congress DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784413586.029>
- [30] Instituto Nacional de Seguros. (2015). Registro de marchamo 1984- 2015.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Inteligencia artificial aplicada a la operación y mantenimiento de aerogeneradores

Artificial intelligence applied on the operation and maintenance of wind turbines

Brandon Obregón¹, Otto Arias-Blanco², Ronny Zúñiga-Granados³, Gustavo Richmond–Navarro⁴

Fecha de recepción: 30 de octubre, 2023

Fecha de aprobación: 2 de marzo, 2024

Obregón, B; Arias-Blanco, O; Zúñiga-Granados, R; Richmond–Navarro, G. Inteligencia artificial aplicada a la operación y mantenimiento de aerogeneradores. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 100-109.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6922>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 bobregon@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-2311-2132>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 blancoariads@hotmail.com
 <https://orcid.org/0009-0002-8575-9085>
- 3 Instituto Costarricense de Electricidad. Costa Rica.
 rzunigag@ice.go.cr
 <https://orcid.org/0009-0009-7910-0277>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 grichmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>



Palabras clave

Turbina eólica; inteligencia artificial; mantenimiento; energía eólica; prevención de fallas.

Resumen

La inteligencia artificial (IA) ha revolucionado la industria de la energía eólica. Gracias a algoritmos de aprendizaje automático, la IA ha mejorado la predicción de la velocidad del viento, permitiendo una generación de energía más eficiente y la reducción de costos operativos. Así mismo, la IA ha demostrado ser útil en el análisis del rendimiento y mantenimiento de las turbinas eólicas, identificando patrones y anomalías para realizar trabajos predictivos, así como perfeccionar la eficiencia operativa. La aplicación de la IA en la energía eólica anticipa un futuro más prometedor y sostenible. La disponibilidad de datos confiables y la integración de energía eólica en las redes eléctricas son aspectos para considerar, pero los avances en algoritmos y capacidades de procesamiento continúan impulsando el potencial de la IA: con su capacidad para optimizar la generación de energía y mejorar el mantenimiento de las turbinas. La IA se posiciona como una herramienta clave para impulsar el crecimiento y desarrollo de la energía eólica a nivel mundial. En este trabajo se exponen los puntos más importantes de la aplicación de la IA en la operación y mantenimiento de aerogeneradores.

Keywords

Wind turbines; artificial intelligence; fault diagnoser; maintenance; wind energy.

Abstract

Artificial intelligence (AI) has revolutionized the wind energy industry. Thanks to machine learning algorithms, AI has improved wind speed prediction enabling more efficient power generation and reduced operating costs. Likewise, AI has proven to be useful in analyzing the performance and maintenance of wind turbines, identifying patterns and anomalies to perform predictive work, furthermore, improve operational efficiency. The application of AI in wind energy anticipates a more promising and sustainable future. The availability of reliable data and the integration of wind energy into power grids are aspects to consider, but advances in algorithms and processing capabilities continue to drive the potential of AI. With its ability to optimize energy generation and improve turbine maintenance. AI is positioned as a key tool to drive the growth and development of wind energy globally. This work presents the most important points of the application of AI in the operation and maintenance of wind turbines.

Introducción

La economía mundial es altamente dependiente de la energía; específicamente de la electricidad. Por esto es primordial alcanzar la mayor eficiencia en toda la cadena de valor desde la generación, la trasmisión, y la distribución de esta, hasta que se entrega al usuario final. Intrínseco a la dependencia de energía, se encuentra el hecho de que los enfoques convencionales de generación de energía eléctrica poseen efectos masivos en el clima global y en el cambio climático. Dado que este proceso, de generación eléctrica, con medios convencionales genera gases de efecto invernadero, los cuales contribuyen al aumento del calentamiento global [1]. Por tanto, se plantea la necesidad de utilizar fuentes limpias, amigables con el ambiente y con una mínima generación de CO₂ [2].

En los últimos años se ha generado grandes avances en las investigaciones y en el desarrollo de energías renovables, éstas son una alternativa viable para un mundo más seguro y eficiente en términos de matriz energética. Entre esas fuentes de energía renovable se encuentra la energía eólica. Esta es una fuente alternativa para suplir esa demanda de energía que se requiere en la actualidad y en el futuro; sin embargo, su disponibilidad depende de las condiciones climáticas. Debido estos factores, se dificulta la integración de la energía eólica en las redes eléctricas existentes. A partir de este punto, se destaca la necesidad de mejorar el rendimiento de la energía eólica, de modo que permita satisfacer la demanda futura, así como una integración más simple a las grandes redes de transmisión y distribución eléctrica.

Según IRENA (International Renewable Energy Agency), entre los años 2018 y 2022 se dio un aumento en la capacidad instalada de aproximadamente un 37% para la energía eólica [3]. La Figura 1 muestra la tendencia desde el año 2012 hasta el año 2022.

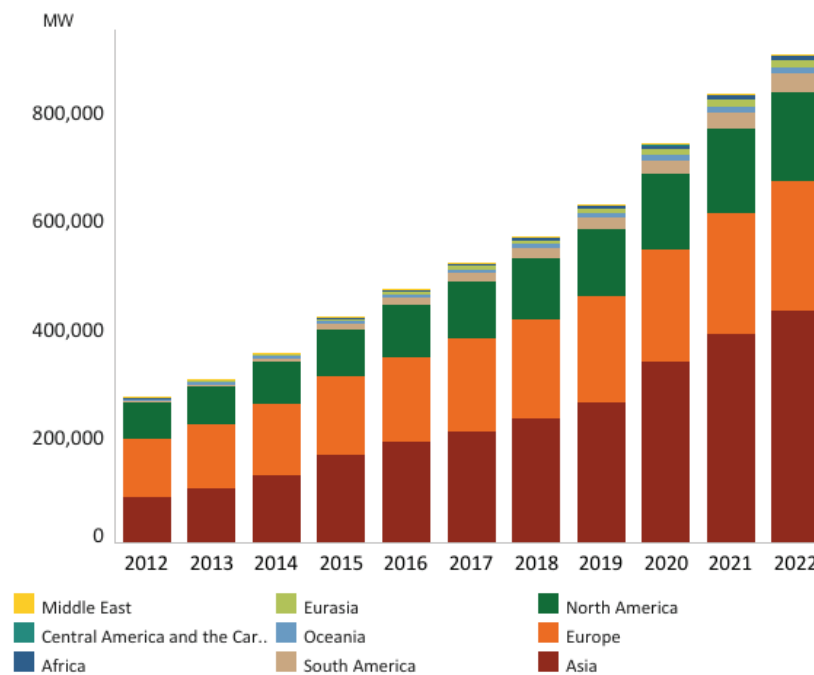


Figura 1. Tendencia de capacidad instalada de energía eólica por región. Fuente: [3].

Con esto en mente, es imperativo abordar los temas de limitaciones de diseño, eficiencia, predicción de rendimiento de los parques eólicos existentes y la estimación de los parámetros de viento de la región donde se instalan las nuevas centrales.

De acuerdo con [2], se resalta la importancia de la IA (Inteligencia Artificial) en el avance de las energías renovables, destacando principalmente aplicaciones en predicción de la velocidad del viento y pronóstico de energía eólica. En años previos, se han realizado investigaciones significativas en el uso de la IA en la energía eólica, en estas se han propuesto y probado, diversas técnicas y enfoques, dentro de estos enfoques se proponen tres categorías principales: aprendizaje neuronal, aprendizaje estadístico y aprendizaje evolutivo [2], [4], [5]. Estos estudios demostraron el potencial de la inteligencia artificial para mejorar la exactitud y eficiencia de la estimación de la velocidad del viento, así como la generación de energía eólica.

Adicionalmente, desde 2016 se ha dado un auge en la incorporación de IA en la industria eólica, específicamente en la atención a la evaluación y análisis del rendimiento para OM (Operation and Maintenance) de aerogeneradores [6]. La inteligencia artificial, por lo tanto, ha tomado un papel fundamental en la actualidad, y su aplicación a la energía eólica no es la excepción.

Existen muchos campos de aplicación, entre los que se destaca la predicción del viento. En la actualidad existen diversos modelos que permiten la recopilación de datos históricos, analizar patrones del clima con el fin de predeterminar los patrones del viento y aprovechar la mayor cantidad de este recurso en la generación de energía.

Por otro lado, se debe destacar el desarrollo de controles óptimos para la predicción y aprendizaje automático de las turbinas, estos métodos permiten a los equipos ajustar de forma autónoma elementos mecánicos operativos como el ángulo de las aspas, la velocidad de rotación con el fin de maximizar la producción de energía y generar una reducción en el estrés de los equipos [7], [8], [9].

Otro aspecto innovador, es la incorporación de sensores en las turbinas eólicas que emplean la tecnología IOT (Internet of Things), la cual permite la comunicación entre los elementos físicos y software con el fin de recabar los datos tomados por los sensores, procesarlos y generar decisiones con base en los análisis recopilados.

Este artículo tiene como objetivo exponer las aplicaciones de la inteligencia artificial en la energía eólica, con énfasis en procesos de optimización y mantenimiento de aerogeneradores.

Para el proceso de revisión bibliográfica se seleccionan bases de datos especializadas en energía eólica y aplicaciones de la inteligencia artificial, dando primordial importancia a las publicaciones comprendidas en el periodo de 2015 a 2023. Se procede a brindar una contextualización de las aplicaciones de IA previo al año 2015 y la evolución hasta la actualidad, además, se profundiza en procesos de optimización en plantas de energía eólica modernas mediante diversos algoritmos de aprendizaje computacional.

Técnicas comunes de análisis de datos, vibraciones y técnicas de IA aplicadas al Mantenimiento Basado en Condición.

Para el periodo abarcado entre el año 2010 y 2015, la tendencia del mantenimiento de turbinas eólicas se basaba en el monitoreo de la condición de los equipos que las componen, enfocándose en los modos de falla del equipo, mínimamente en la evaluación y el análisis del rendimiento [6]. El análisis de vibraciones ha sido una técnica popular para el diagnóstico de fallas en estructuras y subcomponentes de turbinas. Existen varios estudios que utilizan señales de vibración y aplican técnicas como EMD (Empirical Mode Decomposition) para detectar fallas incipientes en los subcomponentes mecánicos y eléctricos de las turbinas. Además, hay estudios que aplican la técnica de SK (Spectral Kurtosis) para el monitoreo basado en condición [10]. Esta técnica ayuda a determinar no estacionariedades en las señales y puede contribuir a la detección de defectos en los subcomponentes de las turbinas.

En cuanto a la aplicación de técnicas de IA, [6] destaca la aplicación de técnicas de inteligencia artificial convencionales para el análisis del rendimiento de las turbinas, como árboles de regresión y técnicas de aprendizaje automático. Sin embargo, las técnicas de inteligencia artificial han sido poco empleadas en la predicción de fallas en turbinas y sus subcomponentes, para el periodo 2010 – 2015.

Es importante utilizar estas tendencias de mantenimiento y monitoreo de la operación, para realizar una identificación de los puntos fuertes y aspectos de mejora; distinguir factores potenciales para futuras aplicaciones de IA en el mejoramiento de la eficiencia de los aerogeneradores bajo el contexto de OM.

El uso de datos SCADA y técnicas de inteligencia artificial en la industria eólica

Hasta 2015, se utilizaron principalmente técnicas basadas en modelos numéricos y procesamiento de señales, especialmente para el monitoreo de la salud de los aerogeneradores utilizando señales de vibración, según lo menciona [6], [9]. La tendencia actual es la utilización de datos SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), se refiere a los datos del sistema de control utilizado en diversos sectores industriales para supervisión, control de procesos y operaciones en tiempo real.

Las técnicas basadas en datos, que utilizan datos históricos de SCADA para entrenar algoritmos de IA, son más económicas y fáciles de usar. Puesto que los aerogeneradores actuales están equipados con sensores capaces de tomar mediciones periódicas, no es necesario instalar dispositivos adicionales de medición.

Desde 2015, se ha experimentado un rápido crecimiento en la aplicación de modelos de ML (Machine Learning) en la toma de decisiones basadas en datos, especialmente utilizando datos SCADA [6]. Con el aumento de la aplicación de IA, se observa un cambio en el enfoque hacia la evaluación y el análisis del desempeño para operación y mantenimiento, algo que no se consideraba anteriormente.

En general, las técnicas de IA, incluyendo el análisis PCA (Principal Component Analysis) y los modelos de aprendizaje profundo, han dominado el desarrollo temprano de la IA en la industria eólica. Se han utilizado técnicas de transformación lineal no supervisadas y el descubrimiento de novedades. Así mismo, se observa un creciente interés en el uso de modelos de aprendizaje profundo como redes neuronales, para tareas como diagnóstico de fallas, pronóstico de energía y optimización de operaciones de los aerogeneradores [6].

Las técnicas de regresión en el monitoreo de la condición y la evaluación del rendimiento de los aerogeneradores; se utilizan para predecir valores continuos de parámetros vitales a lo largo del tiempo, como la potencia generada, velocidad del viento, dirección del viento, etc., utilizando datos SCADA, mismos que varían con el tiempo y son adecuados para el aprendizaje supervisado. En años recientes, se ha observado un aumento significativo en el uso de técnicas de ML, especialmente técnicas de aprendizaje profundo, por ejemplo, redes neuronales recurrentes y redes neuronales de memoria a corto y largo plazo, para predecir parámetros operativos vitales de los aerogeneradores. Estas técnicas han demostrado ser superiores a las opciones convencionales de regresión; además, pueden tener en cuenta la información temporal pasada, lo que las hace adecuadas para el procesamiento de datos secuenciales en la industria eólica [6].

IA en la prevención de fallas

En cuanto a la aplicación de la inteligencia artificial en el proceso de detección temprana de fallas, [6] detalla estudios en el uso de SVM (Support Vector Machine) en la predicción de fallas incipientes en múltiples subcomponentes del aerogenerador. Adicionalmente, se han utilizado árboles de decisión, así como bosques aleatorios para la detección y aislamiento de fallas; identificando señales SCADA importantes y analizando las fallas previstas.

Además, se menciona el uso de frameworks de big data para desarrollar sistemas de mantenimiento predictivo en tiempo real utilizando algoritmos como el bosque aleatorio. Destacan también, el análisis CART (Classification and Regression Tree) como una herramienta prometedora para identificar causas fundamentales de las fallas en los aerogeneradores [6].

Plantas de energía eólica modernas

Es importante describir cómo se realiza el control de las WPP (Wind Power Plant), este está conformado por diversas etapas, dentro de las cuales se pueden destacar: La operación de una sola turbina eólica, como el control de paso y par, así como la alineación de la dirección (yaw), dichas variables se manejan localmente en la unidad de control de la turbina, que actúa como la primera capa.

Con respecto al yaw o también conocido como ángulo de guiñada, consiste en el ángulo de rotación presente con respecto al eje vertical, como se muestra en Figura 2.a) la turbina presenta un desalineamiento de γ grados, con respecto al eje vertical, mientras que en el caso de la Figura 2.b) no está presente el desalineamiento, de decir, [11].

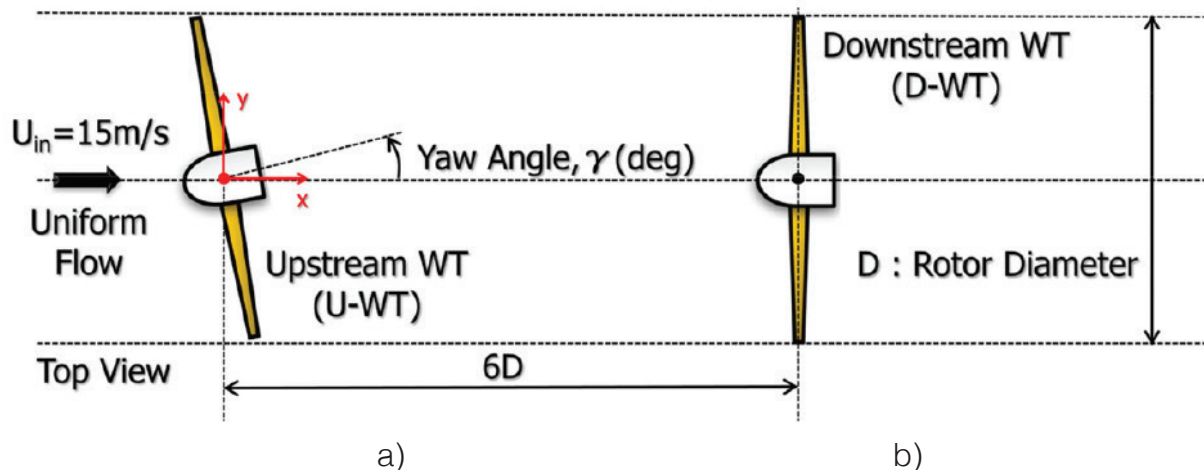


Figura 2. Representación de yaw (ángulo de guiñado) en turbina: a) turbina con desalineamiento b) turbina sin desalineamiento. Fuente: [11].

Asimismo, en la segunda capa, el operador de WPP puede definir un límite de potencia externo para cada turbina eólica, esto permite garantizar que la producción de energía global de WPP pueda limitarse a un valor deseado.

La operación de cada turbina está, por lo tanto, sujeta al límite externo del operador de WPP, mientras que el ángulo de yaw generalmente permanece sin cambios. Por otro lado, la tercera capa está conformada por el operador de la red eléctrica, quien indica la potencia activa y reactiva máxima tolerable para ingresar a la red, el WPP debe cerciorarse cumplir con los requisitos previo a suministrar la energía eléctrica.

Si bien la estructura descrita garantiza la capacidad de limitar la producción de energía proveniente de WPP, existe una carencia en la implementación bajo condiciones normales de funcionamiento, es decir, no se aplica este procedimiento a menos que se requiera restringir la potencia. Una correcta coordinación de las operaciones de las turbinas eólicas permitiría maximizar la generación de energía y disminuir el estrés mecánico en el sistema [7], [8].

Es de suma importancia destacar la existencia de factores con capacidad de afectar la producción de energía eólica; entre ellos se destacan las interacciones de estela, las cuales se originan cuando el viento se relaciona con las turbinas y genera perturbaciones. Estas perturbaciones, pueden afectar negativamente el rendimiento de las turbinas, al disminuir la potencia generada, así como el desencadenamiento de estrés mecánico en los componentes de los aerogeneradores.

Existen herramientas creadas para mitigar estos aspectos negativos como: ajustar el ángulo de desviación para desviar las estelas lejos de las turbinas ubicadas aguas abajo (WRC, Wake Redirection Control) y aumentar el ángulo de inclinación para lograr una limitación de potencia que reduzca la extracción de energía del flujo de viento (AIC, Axial Induction Control) [7]. Es importante destacar que, el WRC cambia el ángulo de yaw de la turbina eólica para desviar las formaciones de estelas resultantes, como se muestra en la Figura 3:

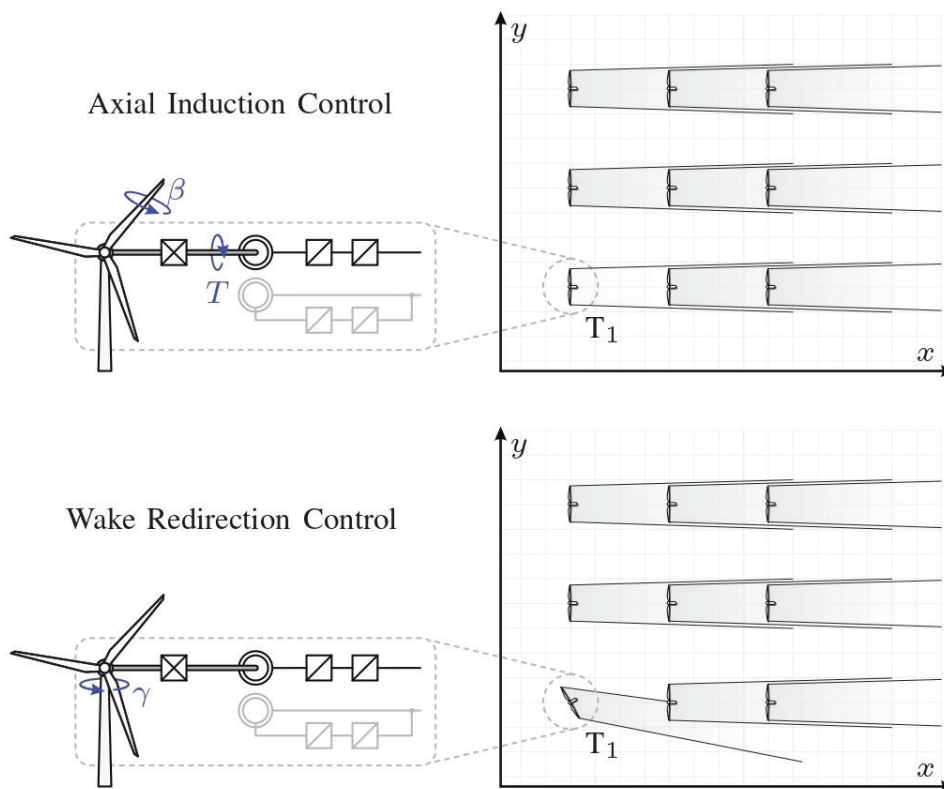


Figura 3. Control de inducción axial. Fuente: [7].

En la figura anterior se observa el control de inducción axial el cual usa el ángulo pitch (β), así como también el torque del generador para limitar la potencia que se extrae del flujo de viento. Por otra parte, el control de redirección de estela cambia el ángulo yaw para desviar la estela lejos de las turbinas posteriores.

Actualmente, el reto existente es generar puntos de ajuste adecuados para aumentar el rendimiento de los parques eólicos, sin que medie la intervención humana. Para ello se investigan innovaciones modernas; como lo son la incorporación de redes neuronales artificiales que sirvan para estimar el comportamiento de un parque eólico, así como garantizar la seguridad operativa del WPP.

Es destacable mencionar que actualmente existen técnicas de entrenamiento para ajustar de la mejor forma los parámetros de las redes neuronales artificiales, se destaca la técnica RL (Reinforcement Learning), esta combina estrategias que permiten que un agente tome decisiones en un entorno y visualice las consecuencias de sus actos, esto quiere decir que en base a los resultados obtenidos se asigne una señal de recompensa o castigo, en comparación con logros previamente definidos [7].

De esta forma, surgen modelos como DRL (Deep Reinforcement Learning) de Agente Central basados en datos SCADA como capa de entrada, los cuales son empleados para entrenar redes neuronales artificiales. El objetivo de este proceso es convertir los datos de entrada en una capa de salida que contenga los puntos de ajuste para WRC y AIC, en este proceso se emplea un tipo de red neuronal de retroalimentación la cual aplica una función activa en el procesamiento de datos que mejora en el tiempo a partir de recompensas previamente definidas [7].

Una alternativa en la obtención de la medición de variables es el modelo DRL de Múltiples Agentes, esta técnica emplea herramientas de aprendizaje por refuerzo, donde en vez de que un agente controle todos los aerogeneradores, el modelo involucra múltiples agentes, estos aprenden continuamente e interactúan con su entorno, basados en función de recompensas y sanciones recibidas de acuerdo con las decisiones optimizadas que se tomen. [7] describe que en el RL distribuido para el control de operación de WPP con comunicación entre turbinas eólicas vecinas, se logró observar un aumento simulado en la producción de energía del 2.58 %, esto muestra la necesidad de un proceso de entrenamiento paso a paso cuando se utilizan modelos de RL de múltiples agentes.

Finalmente, un tercer concepto analizado es el modelo de regresión, la idea básica es entrenar una técnica de Inteligencia artificial para estimar la producción de potencia global y las cargas mecánicas en diversos escenarios y posteriormente seleccionar la combinación de puntos de ajuste que conduzca al mejor resultado [7].

El objetivo de esta técnica es obtener un modelo matemático preciso que relacione de las variables de entrada como: la dirección del viento, la velocidad, características ambientales con la producción de energía eólica. Es importante destacar que un modelo de regresión basado en inteligencia artificial puede analizar grandes volúmenes de datos históricos, estudiar las condiciones ambientales donde se ubiquen las turbinas, aprender patrones y generar predicciones más precisas con el fin de garantizar el máximo aprovechamiento del recurso eólico.

Implementación de técnicas IOT en energía eólica

El desafío fundamental para el desarrollo del sistema de conversión de energía eólica es la inestabilidad natural de este recurso, por tanto, el IOT ha surgido como un enfoque inteligente y práctico para la gestión de sistemas de energía renovable [12]. Existen numerosas herramientas en la actualidad, por medio de las cuales pueden desarrollarse propuestas de mejora y autonomía en la producción de energía eólica, se destacan la presencia de placas microelectrónicas, sensores ultrasónicos para medir la velocidad del viento, sensores de vibración los cuales son empleados para monitorear las condiciones de operación de las turbinas y anteceder la ocurrencia de fallos a través del desarrollo de rutinas de mantenimiento preventivo; además, herramientas de desarrollo web, paneles de visualización, entre otros. Por ejemplo, [12] describe un sistema IOT integrado con un controlador FPGA para proporcionar los datos instantáneos de velocidad del viento en un lugar seleccionado y visualizar la salida

del sistema de emulación de viento, además de esto, se complementa con el uso de una placa llamada ESP8266, la cual complementa internamente un microcontrolador y un módulo de conectividad WIFI, esto permite enviar y recibir datos de forma remota.

Conclusión

Después de describir las aplicaciones de la IA en el campo de la energía eólica, particularmente en los procesos de optimización y mantenimiento de aerogeneradores, es posible llegar a las siguientes conclusiones

- El análisis de vibraciones ha sido una técnica popular para el diagnóstico de fallas en las turbinas, mientras que las técnicas de IA convencionales se han utilizado para analizar el rendimiento. Sin embargo, se ha encontrado que las técnicas de IA fueron poco utilizadas para predecir fallas en turbinas y sus subcomponentes en el periodo anterior a 2015.
- Actualmente, hay un cambio hacia el uso de datos SCADA y técnicas de IA en la industria eólica, lo que permite un monitoreo más económico y fácil de usar utilizando algoritmos de aprendizaje automático.
- Existe un creciente interés en el uso de técnicas de aprendizaje profundo para tareas como diagnóstico de fallas, pronóstico de energía y optimización de operaciones de los aerogeneradores.
- En cuanto a la prevención de fallas, se ha utilizado diversas técnicas de IA, como máquinas de vectores de soporte y árboles de decisión, para detectar y aislar fallas en los aerogeneradores.

El uso de la IA está transformando el mantenimiento y monitoreo de las turbinas eólicas con un enfoque hacia la mejora del rendimiento y la prevención de fallas. Empleando herramientas como lo son modelos de aprendizaje por refuerzo profundo o de regresión se pueden determinar puntos de ajuste para el ángulo pitch y la limitación de potencia para el control activo de estela, lo que sin duda aumenta la eficiencia del aprovechamiento del recurso eólico, así como la vida de los aerogeneradores.

Referencias

- [1] International Atomic Energy Agency, "Health and Environmental Impacts of Electricity Generation Systems, Technical Reports Series No. 394," IAEA, Vienna, 1999.
- [2] S. Jha, J. Bilalovic, A. Jha, N. Patel and H. Zhang, "Renewable energy: Present research and future scope of Artificial Intelligence," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, no. 1364-0321, pp. 297-317, 2017.
- [3] IRENA, "Trends in Renewable Energy by Region-Dataset.," July 2022. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>. [Accessed 13 August 2023].
- [4] M. Lei, S. Luan, J. Chuanwen, L. Hongling and Z. Yan, "A review on the forecasting of wind speed and generated power," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 4, pp. 915-920, 2009.
- [5] A. Foley, P. Leahy, A. Marvuglia and E. McKeogh, "Current methods and advances in forecasting of wind power generation," *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 1-8, 2012.
- [6] J. Chatterjee and D. Dethlefs, "Scientometric review of artificial intelligence for operations & maintenance of wind turbines: The past, present and future," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, no. 1364-0321, p. 111051, 2021.
- [7] P. Krajinski, K. Günther and C. Sourkounis, "Advanced operation control in wind power plants using active wake control methods and artificial intelligence - state of research and concept for the project "SmartWind",," in *20th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants (WIW 2021)*, Germany, IET, 2021, pp. 423-429.

- [8] P. Krajinski and C. Sourkounis, "Implementation of an Advanced Operation Control for AI-based Wind Farm Power Maximization Using Wake Redirection and Artificial Neural Networks," in *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2022*, pp. 1-6.
- [9] J. Tautz-Weinert and S. Watson, "Using SCADA data for wind turbine condition monitoring – a review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, pp. 382-394, 2017.
- [10] L. Saidi, E. Bechhoefer, J. Ben Ali and M. Benbouzid, "Wind turbine high-speed shaft bearing degradation analysis for run-to-failure testing using spectral kurtosis," in *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2015, pp. 267-272.
- [11] T. Uchida, K. Shibuya, G. Richmond-Navarro and W. R. Calderón-Muñoz, "A wind tunnel investigation of yawed wind turbine wake impacts on downwind wind turbine performances and wind loads," *Wind Engineering*, vol. 47, no. 3, pp. 655-670, 2023.
- [12] R. R. Singh, S. Banerjee, R. Manikandan, K. Kotecha, V. Indragandhi and S. Vairavasundaram, "Intelligent IoT Wind Emulation System Based on Real-Time Data Fetching Approach," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78253-78267, 2022.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica general de este artículo, empleamos la herramienta de IA *ChatGPT*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.

Capitales naturales y su conservación en comunidades rurales de Guatemala

Natural Capitals and their Conservation in Rural Communities of Guatemala

Carlos Augusto Vargas-Gálvez¹, Michelle Bustamante-Castillo², Manuel A. Barrios-Izás³

Fecha de recepción: 26 de agosto, 2023


Fecha de aprobación: 18 de diciembre, 2023

Vargas-Gálvez, C.A; Bustamante-Castillo, M; Barrios-Izás, M.A. Capitales naturales y su conservación en comunidades rurales de Guatemala. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 110-132.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6830>

1 Centro Universitario de Zacapa, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

 carlosvargas@cunzac.edu.gt

 <https://orcid.org/0000-0003-1754-1244>

2 Centro Universitario de Zacapa, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

 michellebustamante@cunzac.edu.gt

 <https://orcid.org/0000-0002-9043-7083>

3 Centro Universitario de Zacapa, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

 manuelbarrios@cunzac.edu.gt

 <https://orcid.org/0000-0002-7526-0224>



Palabras clave

Comunidades rurales; estrategias de conservación; valorización de capitales naturales; conservación de la biodiversidad.

Resumen

Los procesos integrales de conservación de los capitales naturales utilizados por comunidades rurales requieren un equilibrio entre su explotación y conservación, con estrategias efectivas basadas en el conocimiento y valoración de estos recursos. Este estudio resalta la importancia y el nivel de valoración que se le da a los capitales naturales en dos grupos de comunidades rurales del oriente de Guatemala, proponiendo medidas de conservación basadas en el estatus de conservación de algunos de estos capitales y en base a programas exitosos de conservación del país. El estudio resalta el reconocimiento de ciertos capitales naturales como los más importantes, como el agua y la energía solar. Además, discute el desafío de conservación para otros capitales como la leña y el ocote debido a su uso ineficiente. El estudio reveló que es esencial promover una mayor conciencia sobre la conexión intrínseca y el respeto hacia la naturaleza en las comunidades rurales en estudio. Fomentar valores como la conservación, la preservación y la armonía con el entorno natural puede fortalecer la relación entre las comunidades y los recursos naturales, impulsando una gestión más responsable y consciente. Al considerar las necesidades y perspectivas de las comunidades locales, se pueden diseñar estrategias más efectivas que promuevan tanto el bienestar humano como la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Keywords

Rural communities; conservation strategies; valuation of resources; biodiversity conservation.

Abstract

The integral processes of conservation of the natural capitals used by rural communities require a balance between their exploitation and conservation, with effective strategies based on the knowledge and valuation of these resources. This study highlights the importance and level of appreciation given to natural assets in two groups of rural communities in eastern Guatemala, proposing conservation measures based on the conservation status of some of these assets and based on successful programs. of conservation of the country. The study highlights the recognition of certain natural capitals as the most important, such as water and solar energy. In addition, it discusses the conservation challenge for other capitals such as firewood and ocote due to their inefficient use. The study revealed that it is essential to promote greater awareness of the intrinsic connection and respect for nature in the rural communities under study. Fostering values such as conservation, preservation, and harmony with the natural environment can strengthen the relationship between communities and natural resources, promoting more responsible and conscious management. By considering the needs and perspectives of local communities, more effective strategies can be designed that promote both human well-being and the conservation of biodiversity and ecosystem services.

Introducción

En la actualidad, la conservación de los recursos naturales y los ecosistemas se ha convertido en una preocupación global [1]. A medida que la conciencia sobre la importancia de la preservación ambiental aumenta, es fundamental comprender cómo valoramos y utilizamos los

capitales naturales de manera sostenible. Estos capitales, como bosques, cuerpos de agua, suelos fértiles y la biodiversidad, son componentes esenciales de nuestro entorno natural y proveen una amplia gama de beneficios para las comunidades rurales y la sociedad en general.

El uso común de los capitales naturales abarca desde la agricultura y la pesca hasta el turismo y la provisión de servicios ecosistémicos. Sin embargo, a menudo nos enfrentamos al desafío de equilibrar la explotación de estos recursos con su conservación a largo plazo. Para abordar esta cuestión, es fundamental seguir un proceso integral que abarque desde el conocimiento y la valoración de estos recursos hasta la implementación de mecanismos efectivos de gestión y uso, culminando en su adecuada protección. Solo mediante este proceso integral podemos encontrar el equilibrio necesario entre la explotación y la conservación a largo plazo de los capitales naturales y los servicios que de ellos obtenemos [2].

La valoración de los capitales naturales no solo implica asignarles un valor monetario, sino también reconocer su importancia cultural, estética o ecológica. Al comprender cómo la sociedad valora estos recursos, podemos desarrollar estrategias que promuevan su conservación y uso sostenible. Además, al considerar las perspectivas de las comunidades locales y los grupos de interés, podemos garantizar que las estrategias sean adecuadas y socialmente justas [3]. En el contexto de las áreas rurales de Guatemala, donde la dependencia de los recursos naturales es más evidente, las estrategias de conservación deben ser especialmente adaptadas a las necesidades y características locales. La implementación de enfoques participativos y el fortalecimiento de capacidades locales pueden fomentar la colaboración entre las comunidades, los actores gubernamentales y las organizaciones no gubernamentales, para garantizar la sostenibilidad de los capitales naturales a largo plazo.

En este trabajo, analizamos cuales son los principales capitales naturales empleados por varias comunidades rurales de una región del oriente de Guatemala, su uso y cómo la valoración de estos recursos puede impulsar estrategias efectivas para su conservación. Se discuten prácticas exitosas en la gestión de capitales naturales que pueden implementarse en el área, destacando la importancia de la participación comunitaria, la educación ambiental y el establecimiento de estrategias aterrizadas en la realidad del país. Todo esto con el fin de contribuir a la generación de conocimiento y acciones concretas para preservar y proteger los capitales naturales de áreas rurales del país asegurando un futuro sostenible.

Métodos

Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en el departamento de Zacapa, ubicado en el oriente de Guatemala. Se recolectaron datos en 12 comunidades rurales situadas a lo largo de dos microcuencas: el río San Pablo y el río Riachuelo (Fig. 1). El río San Pablo tiene su origen en las montañas del municipio de la Unión, donde atraviesa dos comunidades. A medida que avanza, atraviesa 27 comunidades en el municipio de Zacapa antes de desembocar en la cuenca del Río Motagua.

El río Riachuelo se origina en la cima de la Sierra del Merendón y fluye hasta su desembocadura en el Río Grande de Zacapa, aproximadamente a una altitud de 170 metros sobre el nivel del mar. A lo largo de su recorrido, atraviesa diversas comunidades, como Guadalupe, Cerro Chiquito, Río Arriba, El Terrero, La Majada, La Trementina y San José Las Flores, ejerciendo influencia también en las comunidades de Cerro Pelón y El Zarzal. Estas áreas circundantes al río albergan principalmente una población rural, donde las principales actividades económicas son la agricultura de subsistencia y la ganadería. Además, se pueden encontrar una variedad de ecosistemas forestales en ambas microcuencas, que incluyen bosques nubosos, bosques

de pino, bosques latifoliados y, en las zonas más bajas, bosques secos. Estos ecosistemas se extienden hasta los bosques de Galería que se encuentran en las orillas de los ríos Grande y Motagua.

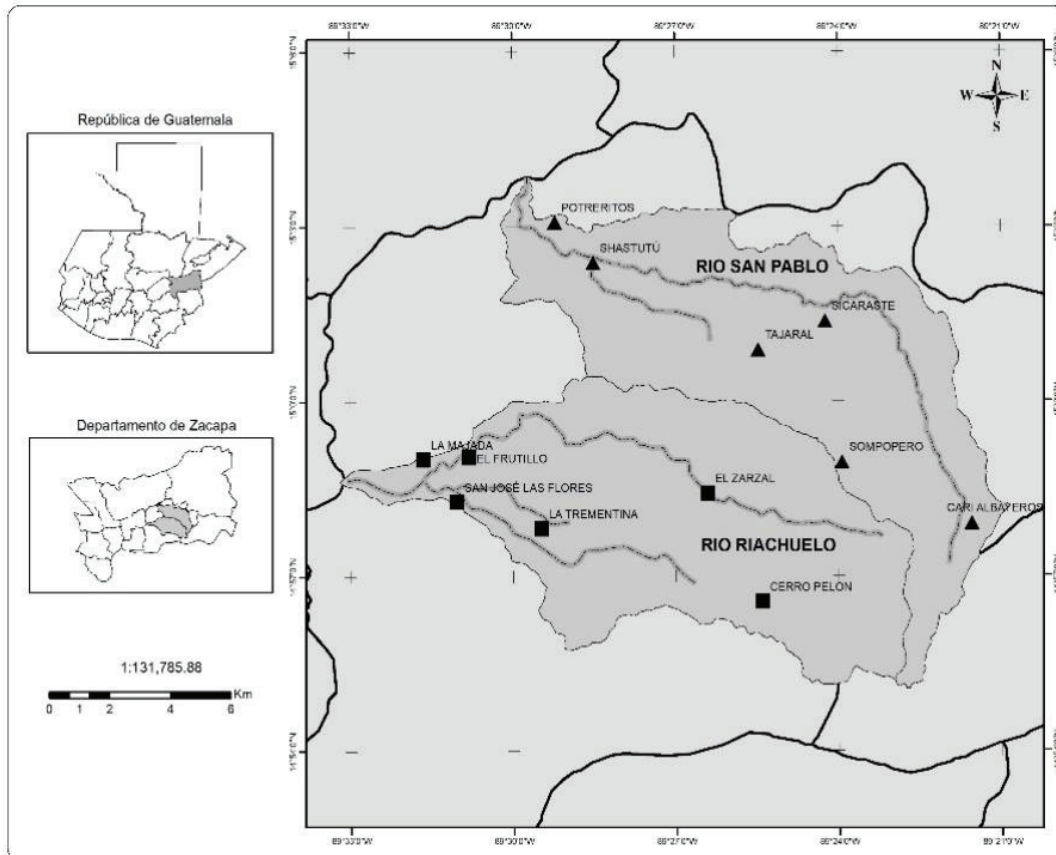


Figura 1. Mapa de ubicación de las doce comunidades muestreadas a lo largo de las dos microcuencas de estudio, río San Pablo y río Riachuelo, en el departamento de Zacapa en Guatemala.

Para este estudio, se realizaron entrevistas a un total de 120 personas, 47 mujeres y 42 hombres. De este grupo, 60 participantes pertenecen a seis comunidades ubicadas en la cuenca del Río Riachuelo, mientras que los otros 60 pertenecen a seis comunidades situadas a lo largo de la cuenca del Río San Pablo en Zacapa. En cada una de estas comunidades se entrevistó a un total de 10 personas.

Las entrevistas se realizaron empleando un enfoque de entrevistas semidirigida, empleando cuestionarios diseñados específicamente para este estudio. Estos cuestionarios incluyeron opciones de respuesta predefinidas que facilitaron la recopilación de datos, pero al mismo tiempo permitieron a los entrevistados expresar su opinión.

En un primer momento, se recopilaban datos generales de los participantes, como nombre, sexo, edad, empleo, nivel de estudios y estatus socioeconómico. Posteriormente, se solicitó a los participantes que identificaran los capitales naturales que utilizan, la frecuencia con la que los emplean y el nivel de importancia que les asignan. Las opciones de frecuencia incluían todos los días, de 3 a 4 días a la semana, 1 día a la semana, 1 a 2 días al mes o por temporada. Para la valoración de la importancia, se utilizó una escala del 1 al 10, donde 1 representaba poca importancia y 10 representaba una importancia muy alta.

También se les pregunto sobre usos y modo de obtención de los capitales naturales. En cuanto al uso de los capitales naturales, se proporcionaron opciones comunes de uso para diferentes tipos de capitales naturales. Además, se presentaron posibles formas de obtención de los recursos, como compra, recolección o donación. Sobre el origen de los recursos, por ejemplo, si provenían de ríos, colinas cercanas, áreas con vegetación en regeneración, cercas, entre otros.

La siguiente sección del estudio se enfocó en identificar los diversos problemas ambientales que podrían afectar a las microcuencas en estudio. Esto se complementó con una serie de preguntas dirigidas a explorar los factores y características sociales y económicas que influyen en el uso y valoración de los recursos naturales. Se abordaron temas como la migración, el entorno económico, la coordinación institucional, así como la participación y organización comunitaria. Estos aspectos se consideran pilares fundamentales para la gestión y sostenibilidad de proyectos relacionados con la conservación de los recursos naturales.

Análisis de datos

Con el fin de caracterizar los capitales naturales presentes en ambas cuencas, se llevó a cabo una clasificación en seis categorías, considerando sus características generales y el origen de estos capitales. Estos grupos se definieron de la siguiente manera: 1) cultivos, 2) frutos y semillas, 3) hierbas, 4) hortalizas, legumbres y productos similares, 5) recursos forestales y 6) productos de origen animal.

Para cada cuenca y cada recurso se calculó un índice de importancia relativa que tomó en cuenta tres variables relacionadas a su importancia y valoración: 1) número de personas que indicaron emplear ese capital natural, 2) frecuencia de uso del recurso y 3) grado de importancia que cada individuo le asigna a dicho recurso.

Para calcular el índice de importancia relativa de cada capital natural primero se asignaron valores numéricos a la variable de frecuencia de uso (F). La asignación de valores se realizó de la siguiente manera: se asignó un valor de 5 a aquellos elementos de uso diario, un valor de 4 a aquellos elementos utilizados de 3 a 4 días por semana, un valor de 3 a aquellos utilizados una vez por semana, un valor de 2 a aquellos utilizados de 1 a 2 días al mes, y un valor de 1 a aquellos utilizados ocasionalmente o solo en una temporada determinada.

Los valores de frecuencia de uso (F) y de valoración (V) se escalonaron empleándola técnica de normalización mínimo-máximo aplicando la fórmula: Valor normalizado = (Valor original - Valor mínimo) / (Valor máximo - Valor mínimo). Con estos valores se calculó un índice de importancia relativa de cada recurso (IR) empleando la siguiente fórmula:

$$IR \text{ (Índice de Importancia Relativa de cada recurso)} = \frac{\sum(NF \times NV)}{1[(NT)(NTt)}$$

Donde:

NF= valor normalizado de la frecuencia de uso

NV= valor normalizado del nivel de valoración que la gente le dio a cada recurso

NT= número total de ocurrencias de cada recurso (número de veces que se mencionó el uso de ese recurso en el conjunto de comunidades analizadas)

NTt= número total de personas entrevistadas en el conjunto de comunidades evaluadas.

Para examinar las similitudes en el uso de capitales naturales entre las doce comunidades analizadas, se llevó a cabo un análisis de agrupamiento utilizando la función *hcut* del paquete *factoextra* de R. Este método computa un dendrograma jerárquico utilizando el método de enlace completo (complete) y posteriormente corta el árbol en dos grupos ($K=2$). Para elaborar

este dendrograma se empleó una matriz de uso de recursos, en las filas las comunidades, en las columnas los capitales naturales y en las casillas de valores el número de personas por comunidad que indicaron el uso de este capital natural. Se empleó este número porque refleja no solo la interacción de comunidad-capital natural si no que un valor de uso por parte de las familias encuestadas.

Se utilizaron diagramas de Venn para analizar las palabras clave, exclusivas o compartidas, que las personas de las comunidades en estudio mencionaron como su principal razón para conservar los capitales de la microcuenca en la que se encuentran ubicados. Los diagramas de Venn consisten en una serie de círculos superpuestos o interconectados, donde cada círculo representa un conjunto y la intersección entre ellos muestra los elementos que comparten en común. Para esto se empleó el paquete ggvenn de R.

Resultados y discusión

Capitales naturales empleados por las comunidades de los ríos Riachuelo y San Pablo

En ambas cuencas se identificaron más de ochenta capitales naturales de distintas procedencias (Cuadro 1), siendo la mayoría de origen vegetal y pocos de origen animal. En particular, los frutos, semillas y hierbas son los capitales naturales con mayor número de elementos utilizados por las comunidades en ambas cuencas (Fig. 2).

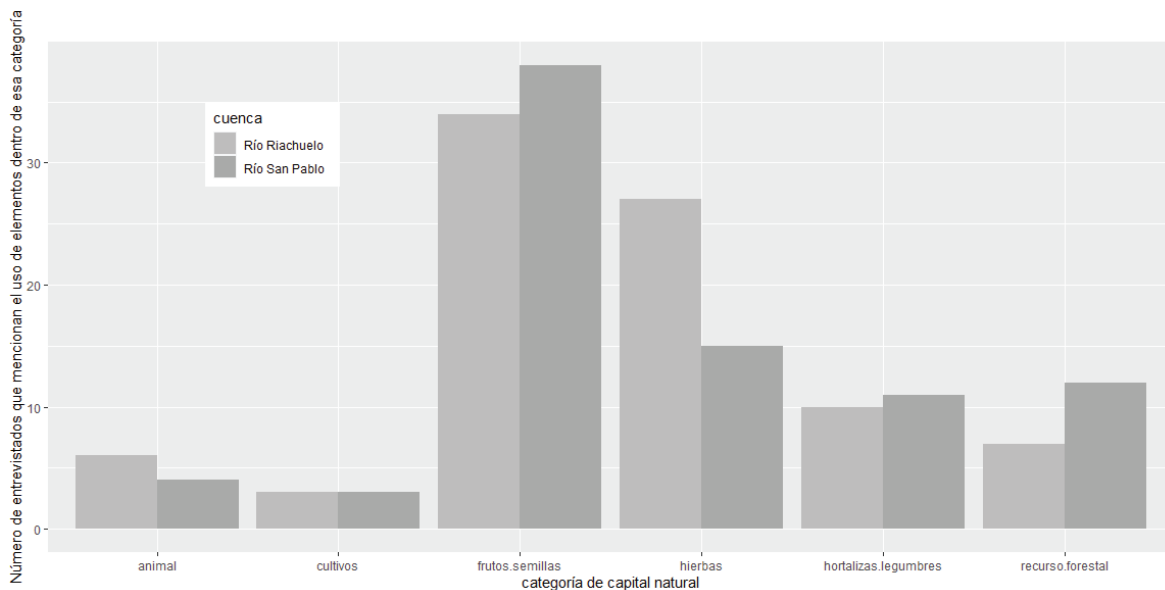


Figura 2. Número de personas encuestadas en las comunidades ubicadas a lo largo de los ríos Riachuelo y San Pablo que mencionan el uso de distintos elementos dentro de las categorías de capital natural analizadas en este estudio.

Los recursos de origen animal registrados son principalmente mamíferos cinegéticos endémicos como los garrobos e iguanas (que pueden ser de distintas especies de la familia Iguanidae) y otros más cosmopolitas como los tacuazines (*Didelphis virginiana* y/o *Didelphis marsupialis*) (Cuadro 1). Estas especies forman parte de un grupo de mamíferos cinegéticos que han sido fuente importante de alimento para las comunidades rurales en Guatemala y América Latina durante siglos. Estas especies incluyen animales como venados, conejos, armadillos, jabalíes y otros, que son cazados por su carne y, a veces, por otros productos como la piel, cuernos o almizcle. Para muchas comunidades rurales en Guatemala, la caza de estos animales

constituye una forma de obtener alimento fresco rico en proteínas. Sin embargo, la fauna silvestre en Guatemala se ha empleado no solo para satisfacer sus necesidades alimenticias, sino también para el intercambio, recreación o con fines medicinales [4]. En relación a esto último, como puede observarse en el Cuadro 1, animales como las iguanas también se emplean con fines medicinales.

Cuadro 1. Capitales naturales de origen animal y uso común que se les dan por las personas encuestadas en Riachuelo y San Pablo, Zacapa. Los números indican la cantidad de personas que mencionaron el uso de este capital natural en su vida cotidiana.

Uso	Capital natural	Nombre científico	Cuenca	
			Riachuelo	San Pablo
Alimento	Conejos		1	0
	Garrobos		9	12
	Iguanas		8	19
	Miel		6	6
	Tacuazines	Didelphis virginiana y/o Didelphis marsupialis	9	8
Alimento y/o venta	Miel		2	1
Medicinal	Iguanas		0	1
	Miel		11	10
Recreativo	Ardillas		1	

Como se mencionó anteriormente, la caza de animales como las iguanas y los garrobos también forma parte de la actividad cultural y tradicional de muchas generaciones de comunidades rurales en la región. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la caza excesiva o no regulada puede tener consecuencias negativas para la biodiversidad y la seguridad alimentaria de estas comunidades. Un ejemplo de ello es la iguana *Ctenosaura palearis*, conocida como iguana de órgano, que es cazada intensivamente en algunas zonas de Zacapa principalmente durante la temporada de reproducción cuando se capturan hembras para extraer sus huevos. A pesar de que la ingesta de iguanas ha sido una práctica común por muchas generaciones en Mesoamérica, la pérdida de hábitat, el comercio ilegal y las prácticas de caza no sostenibles están afectando su supervivencia [5].

La disminución en las poblaciones de iguanas salvajes se debe en gran parte a la creciente cantidad de tierra utilizada para cultivos y al establecimiento de asentamientos humanos [6]. Por lo tanto, aunque la caza de garrobos e iguanas forma parte de la cultura y tradición de las comunidades rurales, es importante que se realice de manera responsable y sostenible para evitar consecuencias negativas tanto para la biodiversidad como para la seguridad alimentaria de estas comunidades.

Es por eso que es importante que se establezcan regulaciones y prácticas sostenibles para la caza de animales cinegéticos en este tipo de comunidades donde el acceso a otras fuentes de proteína animal es más difícil. Esto puede incluir la implementación de límites de caza, el establecimiento de áreas de caza protegidas, la promoción de prácticas de caza sostenibles y la educación sobre la importancia de la conservación de la biodiversidad. En este sentido, uno de los mecanismos utilizados para lograr este objetivo es el establecimiento de calendarios cinegéticos para cada especie que se caza con fines alimenticios. Estos calendarios establecen las fechas y épocas de caza permitidas, así como las zonas donde se pueden realizar estas actividades.

La implementación de estos calendarios permite asegurar que la caza se realice en momentos y lugares adecuados, evitando así el impacto negativo sobre la población de las especies animales cazadas. Asimismo, la implementación de estos calendarios ayuda a evitar la sobreexplotación de las poblaciones de animales cazados, fomentando así la conservación de los recursos naturales y la sostenibilidad de las comunidades que dependen de la caza como fuente de alimento. Por lo tanto, resulta crucial difundir la información de los calendarios cinegéticos de Guatemala, elaborados por CONAP, principalmente de la región cinegética 3 a la que pertenece Zacapa, con el fin de garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales y la seguridad alimentaria de las poblaciones locales en estudio [7].

La miel también es reconocida por las personas encuestadas como un capital natural importante. Las personas que mencionan el uso de este capital natural indican que la obtienen a partir de la recolecta en distintas áreas naturales en los alrededores de su comunidad. Como indica el Cuadro 2, la miel es utilizada tanto para consumo directo como para la elaboración de bebidas medicinales, e incluso tiene un papel importante en la economía de algunas familias pues suelen venderla en mercados locales. Esto muestra que las abejas además de ser clave en prestar servicios ecológicos como la polinización también son importantes en términos de nutrición y económicos para las familias de estas cuencas. Además, la producción de miel también promueve la conservación de la biodiversidad local, ya que las abejas dependen de una variedad de plantas y flores para obtener el néctar que se convierte en miel.

A pesar de esto, las abejas se enfrentan a muchos desafíos para el mantenimiento de estos servicios, incluyendo cambios en el uso del suelo, el cambio climático, uso de pesticidas, deforestación y pérdida de hábitat, cambios de humedad en ambientes naturales, enfermedades, entre otros [8]. Las preocupaciones sobre la disminución de las abejas domésticas y silvestres han intensificado la necesidad de fomentar estrategias para su conservación en ambientes naturales y su uso sostenible en cultivos [8]. Algunas medidas que podrían aplicarse a estos ambientes rurales de las cuencas Riachuelo y San Pablo podrían ser el conservar y restaurar los hábitats naturales de los polinizadores, como los bosques, los pastizales y en los alrededores de las áreas cultivadas. También se podría promover la diversidad de cultivos y plantas en las áreas cultivadas, ya que esto proporciona una fuente de alimento para los polinizadores durante todo el año. Además, el reducir el uso de pesticidas y otros productos químicos en las áreas cultivadas, y utilizar métodos alternativos de control de plagas, como el control biológico. Finalmente, se podrían promover el uso de prácticas agrícolas sostenibles, como la rotación de cultivos y el uso de abonos orgánicos, para mantener la salud del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos [9]. Todo esto tendría que realizarse mediante la colaboración entre campesinos y comunidades para crear corredores de polinización y promover la conservación de los polinizadores a nivel local.

Una observación interesante se recolectó en la cuenca Riachuelo donde un comunitario indicó que animales como las ardillas tienen beneficios recreacionales. La observación de la vida silvestre, ya sea a través de visitas a áreas naturales o simplemente a partir de la naturaleza que rodea nuestra casa, puede tener un gran impacto en nuestra salud y bienestar. La presencia de animales silvestres, como las ardillas y aves, proporciona una conexión con la naturaleza y permite disfrutar de la belleza y tranquilidad del mundo natural. Esta conexión con la naturaleza también puede mejorar la salud mental y emocional, disminuyendo los niveles de estrés y ansiedad [10]. Además, la observación de la vida silvestre puede fomentar un mayor interés y compromiso con la conservación y el cuidado del medio ambiente, ya que nos permite comprender mejor la importancia de la biodiversidad y los ecosistemas saludables [11].

Por otra parte, la mayor parte de los capitales naturales que son frutos y semillas se emplean en como fuente de alimentación para las comunidades estudiadas (Cuadro 2). Los bananos, el frijol, la guayaba, los mangos, jocotes, limones y naranjas son reconocidos por numerosas familias

como importantes alimentos en su dieta. Los datos muestran que muchas familias además de consumir estos frutos y semillas las venden como parte de sus actividades económicas y otras son empleadas con fines medicinales. Cabe resaltar que varios de estos recursos no son nativos (y que pueden considerarse como alimentos cultivados), pero se incluyeron en esta discusión pues son recursos que crecen en ambientes naturales y que forman parte del entorno natural de los comunitarios.

Las hierbas nativas con usos medicinales son una parte fundamental de la medicina tradicional en Mesoamérica. A lo largo de los siglos, las comunidades locales de la región mesoamericana han identificado y utilizado una amplia variedad de plantas para tratar diferentes dolencias y mantener la salud general. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) más de dos tercios de la población mundial utiliza plantas medicinales para atender sus dolencias psicofísicas [12]. En este estudio, se registraron numerosas hierbas que son empleadas con fines medicinales (Cuadro 3). Algunas de las hierbas que fueron mencionadas con mayor frecuencia fueron el apazote, la hierba buena, la hierba de cáncer, la hierba de toro, la hierbamora y la hierbabuena. Estas hierbas tienen propiedades curativas que pueden ser utilizadas para tratar desde trastornos digestivos y respiratorios hasta enfermedades del corazón y del sistema nervioso. Además de su uso en medicina natural, muchas de estas hierbas tienen importancia alimenticia para estas comunidades y se utilizan para dar sabor a tamales, atoles o frescos. En este sentido, es relevante destacar que existe una alta proporción de plantas medicinales que se encuentran en peligro de extinción debido a la pérdida de hábitat y pérdida de recursos genéticos en sus poblaciones naturales [13]. Por ello, la preservación y la promoción de su uso en la medicina y la cocina son esenciales para mantener la biodiversidad y la cultura de esta área, y para garantizar la salud y el bienestar de estas comunidades locales.

En este trabajo también se registraron numerosos capitales naturales que comprenden hortalizas, legumbres y recursos similares que se emplean principalmente como parte de la dieta de las personas de estas comunidades (Cuadro 4). El consumo de hortalizas y legumbres en comunidades rurales de países como Guatemala puede tener una gran importancia para la salud nutricional de estas poblaciones ya que son plantas ricas en vitaminas, minerales, fibra y fitoquímicos, y pueden proporcionar una serie de beneficios para la salud. Además, las que son de origen Mesoamericano tienen aún mayor importancia pues son recursos locales que son fáciles de obtener del campo o cultivar. Por ejemplo, la flor de izote es una planta comestible, es rica en fibra, vitamina C, vitamina A, hierro y calcio. Su consumo puede contribuir al aporte de nutrientes esenciales en la dieta de las comunidades rurales. Esta planta también es comúnmente cultivada en los huertos familiares, como ornamental y ampliamente usada como barrera viva para el control de la erosión. Se usa como cercos vivos y como mojones de terrenos, sus tallos son exportados a Europa para ser cultivadas como ornamentales bajo techo [14].

Cuadro 2. Usos comunes de frutos y semillas considerados como capitales naturales por parte de las personas encuestadas en Riachuelo y San Pablo, Zacapa. Los números indican la cantidad de personas que reconocen estos capitales naturales y el uso que le dan.

Uso	Capital natural	Nombre científico	Cuenca	
			Riachuelo	San Pablo
Alimento	Almendro	<i>Terminalia catappa</i> L.	3	4
	Ayote	<i>Cucurbita argyrosperma</i> C.Huber.	3	2
	Banano	<i>Musa × paradisiaca</i> L.	12	13
	Chicozapote	<i>Manilkara zapota</i> (L.) P.Royen		2
	Chile	<i>Capsicum</i> sp.	1	2
	Chile dulce	<i>Capsicum annuum</i> L.		2
	Coco	<i>Cocos nucifera</i> L.	8	9
	Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	10	27
	Granadilla	<i>Punica granatum</i> L.	3	28
	Guamo	<i>Inga spuria</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.		1
	Guanaba	<i>Annona muricata</i> L.		1
	Guayaba	<i>Psidium guajava</i> L.	20	39
	Jocote	<i>Spondias purpurea</i> L.	9	8
	Jocote de mico	<i>Spondias</i> sp.		2
	Limas	<i>Citrus</i> sp.	2	1
	Limón	<i>Citrus × limon</i> (L.) Osbeck	8	8
	Mamey	<i>Mammea americana</i> L.	2	2
	Mandarina	<i>Citrus deliciosa</i> Ten.	5	5
	Mango	<i>Mangifera indica</i> L.	15	18
	Maracuyá	<i>Passiflora edulis</i> Sims	1	
	Marañón	<i>Anacardium occidentale</i> L.	3	3
	Mutas	<i>Bromelia pinguin</i> L.	4	5
	Nance	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth.	4	3
	Naranja	<i>Citrus × aurantium</i> L.	12	7
	Pacaya	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm.	3	1
	Pacaya de palmo	<i>Chamaedorea</i> sp.		1
	Papaya	<i>Carica papaya</i> L.	6	5
	Paterna	<i>Inga vera</i> Willd.	2	1
	Pitahaya	<i>Hylocereus undatus</i> (Haw.) Britton & Rose		1
	Plátano	<i>Musa</i> sp.		4
	Pomelos	<i>Citrus</i> sp.		1
	Tamarindo	<i>Tamarindus indica</i> L.	1	4
	Tuna	<i>Nopalea</i> sp.	1	2
Zapote	<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H.E.Moore & Stearn	1	1	
Sincuya	<i>Annona purpurea</i> Moc. & Sessé ex Dunal	1		
Sunco	<i>Licania platypus</i> (Hemsl.) Fritsch, Ann. Naturhist. Hofmus.	1		

Uso	Capital natural	Nombre científico	Cuenca	
			Riachuelo	San Pablo
Alimento y venta	Anona	<i>Annona squamosa</i> L.	2	
	Banano	<i>Musa × paradisiaca</i> L.	1	
	Coco	<i>Cocos nucifera</i> L.	1	
	Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	1	1
	Limón	<i>Citrus × limon</i> (L.) Osbeck	1	
	Mango	<i>Mangifera indica</i> L.	1	
	Plátano	<i>Musa</i> sp.	1	
	Zapote	<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H.E.Moore & Stearn.	1	
Artesanía	Bellotas	No identificada		1
Construcción	Zapatón	No identificada		1
Medicinal	Banano	<i>Musa × paradisiaca</i> L.	1	
	Frijolillo	<i>Desmodium triflorum</i> (L.)	1	
	Granadilla	<i>Punica granatum</i> L.	1	
	Guapinol	<i>Hymenaea Courbaril</i> L.	1	
	Limón	<i>Citrus × limon</i> (L.) Osbeck	2	
	Piñón	<i>Jatropha curcas</i> L.		1
		Semilla de sunzo	No identificada	

Cuadro 3. Hierbas consideradas como capitales naturales, y usos comunes, por parte de las personas encuestadas en Riachuelo y San Pablo, Zacapa. Los números indican la cantidad de personas que reconocen estos capitales naturales y el uso que le dan.

Uso	Capital natural	Nombre científico	Cuenca	
			Riachuelo	San Pablo
Alimento	Albahaca	<i>Ocimum basilicum</i> L.	1	
	Apazote	<i>Dysphania ambrosioides</i> (L.) Mosyakin & Clemants	1	1
	Verbena	<i>Verbena litoralis</i> Kunth	1	
	Bledo	<i>Amaranthus</i> sp. L.		1
	Cerelio	No identificada		1
	Chipilín	<i>Crotalaria longirostrata</i> Hook. & Arn.	1	1
	Cilantro	<i>Stellaria</i> sp.	2	
	Cilantro de tripa	<i>Stellaria ovata</i> Willd. ex Schlecht. Ges.		2
	Hierba del cáncer	<i>Acalypha arvensis</i> Poepp.	1	
	Hierba del toro	<i>Tridax procumbens</i> L.	2	1
	Hierbabuena	<i>Mentha</i> sp.	6	26
	Hierba mora	<i>Solanum americanum</i> Mill.	3	5
	Lero	No identificada	1	
	Loroco	<i>Fernaldia pandurata</i> (A. DC.) Woodson, Ann. Mo. Bot. Gard.	1	3
	Orégano	<i>Lippia origanoides</i> Kunth.		1
	Quilete	<i>Solanum americanum</i> Mill.		1
	Zacate	No identificada		1
	Medicinal	Santa María	<i>Piper auritum</i> Kunth.	2
Uruguay		<i>Melicoccus bijugatus</i> Jacq.		2
Albahaca		<i>Ocimum basilicum</i> L.	1	
Apazote		<i>Dysphania ambrosioides</i> (L.) Mosyakin & Clemants	5	3
Buganvillas		<i>Bougainvillea</i> sp.	1	
Carboncillo		<i>Acaciella angustissima</i> (Mill.) Britton & Rose	1	
Cirina		<i>Ixora coccinea</i> L.	1	
Coralillo		<i>Hamelia patens</i> Jacq.	1	
Flor de corazón		No identificada	1	
Hierbabuena		<i>Mentha</i> sp.		2
Hierba del cáncer		<i>Acalypha arvensis</i> Poepp.	5	2
Hierba del toro		<i>Tridax procumbens</i> L.	3	4
Hierbabuena		<i>Mentha spicata</i> L., 1753	17	18
Hierba mora		<i>Solanum americanum</i> Mill.	3	2
Lero		No identificada	1	
Manzanilla		<i>Tanacetum parthenium</i> (L.) Sch.Bip.	2	
Pimientillo		<i>Phyllanthus elsiae</i> Urb.	1	
Ruda		<i>Ruta graveolens</i> L.	3	
Salvia santa		<i>Buddleja americana</i> L.	1	
Salviasija		<i>Lippia alba</i> (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P.Wilson	2	
Sobón	No identificada	1		
Té de limón	<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) Stapf		1	
Suquinay	<i>Vernonia</i> sp.	1		
Ornamental	Buganvillas	<i>Bougainvillea</i> sp.	1	
	Chula	<i>Catharanthus roseus</i> (L.) G. Don, 1837	1	
	Té de limón	<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) Stapf	1	

Cuadro 4. Hortalizas, legumbres y recursos similares consideradas como capitales naturales, y usos comunes, por parte de las personas encuestadas en Riachuelo y San Pablo, Zacapa. Los números indican la cantidad de personas que reconocen estos capitales naturales y el uso que le dan.

Uso	Capital natural	Nombre científico	Cuenca	
			Riachuelo	San Pablo
Alimento	Cebolla	<i>Allium cepa</i> L.	1	0
	Clavel	<i>Dianthus caryophyllus</i> L., 1753	8	7
	Flor de izote	<i>Beaucarnea</i> sp.	3	2
	Güisquil	<i>Sicyos edulis</i> Jacq.	3	3
	Izote	<i>Beaucarnea</i> sp.	2	3
	Jengibre	<i>Zingiber officinale</i> Roscoe	1	0
	Ocra	<i>Abelmoschus esculentus</i> (L.) Moench	0	1
	Orqueta	<i>No identificada</i>	1	
	Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.	1	1
	Repollo	<i>Brassica oleracea</i> L.		1
	Sábila	<i>Aloe vera</i> (L.) Burm.f.		1
	Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	1	3
	Tomate silvestre	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	1	0
Yuca	<i>Manihot esculenta</i> Crantz	0	3	
Medicinal	Sábila	<i>Aloe vera</i> (L.) Burm.f.	0	4
Ornamental	Clavel	<i>Dianthus caryophyllus</i>	5	13

En este trabajo se registraron varios capitales naturales de origen forestal (Cuadro 5). La mayoría de estos capitales se emplean con fines de preparación de alimentos y para la construcción. Algo interesante de resaltar es que muchas de estas especies forestales son nativas de los bosques secos y montaña del país y no exóticas o cultivadas *per se*, tal como el madrecaao (*Gliricida sepium*), el matiliguante (*Tabebuia rosea*), el Guarumo (*Cecropia peltata* o *C. obtusifolia*) o el Guachipilin (*Diphysa americana*). También se registraron algunos con fines medicinales como el eucalipto que se emplea según se mencionó para curar enfermedades respiratorias.

Cuadro 5. Capitales naturales de origen forestal y uso común que se les dan por las personas encuestadas en Riachuelo y San Pablo, Zacapa. Los números indican la cantidad de personas que reconocen estos capitales naturales y el uso que le dan.

Usos	Capital natural	Nombre científico *	Cuenca	
			Riachuelo	San Pablo
Alimento	Bambú	<i>Guadua angustifolia</i> Kunth 1822		1
	Cadeno	No identificado		1
	Guachipilín	<i>Diphysa americana</i> (Mill.) M. Sousa.		1
	Laurel	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken 1841		1
	Madrecacao	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.		1
	Matilisguate	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) Bertero ex A.DC.		1
	Musgo			1
	Nopal		1	
	Ocote		1	3
	Palmo		1	
Artesanía	Cedro	<i>Cedrela</i> spp.		1
	Pino	<i>Pinus</i> spp.		1
Construcción	Bambú			2
	Cedro	<i>Cedrela</i> spp.		2
	Guachipilín	<i>Diphysa americana</i> (Mill.) M. Sousa.		1
	Laurel	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken 1841		1
	Salamo	No identificado		1
Fuente de energía	Leña	No aplica	3	10
Medicinal	Eucalipto	<i>Eucalyptus cinerea</i> F.Muell. ex Benth.	1	
	Guarumo	<i>Cecropia</i> sp.	1	
	Madre cacao	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	1	

Nota: No se incluyó el nombre científico de todas las especies forestales debido a que solo se recopilieron los nombres comunes proporcionados por la gente local.

Se identificaron varios recursos obtenidos a través del cultivo (Cuadro 7). Es importante tener en cuenta que, aunque un recurso cultivado no puede considerarse *per se* como un capital natural, su obtención depende de diversos capitales naturales y servicios ecosistémicos, como el suelo, la energía solar y el agua. Además, cualquier práctica agrícola está sujeta a los ciclos naturales y depende de diversos servicios ecosistémicos que deben preservarse para garantizar su sostenibilidad [15]. Por ejemplo, la polinización de los cultivos, el control de plagas y la fertilidad del suelo también pueden considerarse parte del capital natural. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la producción de cultivos a menudo implica un uso intensivo de recursos naturales, como el agua, el suelo y la energía, así como la generación

de residuos y emisiones contaminantes, lo que puede tener impactos negativos en el capital natural y en el medio ambiente en general. Por lo tanto, una gestión sostenible de la producción agrícola resulta esencial para asegurar que los cultivos formen parte de un sistema económico y social sostenible a largo plazo, que respete y proteja el capital natural.

Cuadro 7. Capitales naturales cultivados y uso común que se les dan por las personas encuestadas en Riachuelo y San Pablo, Zacapa. Los números indican la cantidad de personas que reconocen estos capitales naturales y el uso que le dan.

Uso	Capital natural	Nombre científico	Cuenca	
			Riachuelo	San Pablo
Alimento	Café	<i>Coffea arabica</i> L.	3	5
	Caña de azúcar	<i>Saccharum officinarum</i> L., 1753	3	9
	Maíz	<i>Zea mays</i> L.	10	32
Venta	Maíz	<i>Zea mays</i> L.	1	
Alimento y venta	Caña de azúcar	<i>Saccharum officinarum</i> L., 1753		1
	Maíz	<i>Zea mays</i> L.	3	1

La mayoría de estos capitales naturales de origen vegetal son recolectados por las familias de parches de bosque cercanos que se encuentran en distintos niveles de perturbación, de árboles y arbustos que se encuentran en potreros propios o cercanos e incluso a partir de cercos vivos que se emplean para rodear sus viviendas, potreros o terrenos propios o comunales. Algunos elementos como los bananos, clavel, frijol, hierbabuena, maíz o sábila son cultivados por algunas familias cuando no los pueden obtener de las áreas antes mencionadas o del bosque.

Importancia relativa de los capitales naturales empleados en las comunidades de las microcuencas de interés

En este estudio la mayoría de familias en ambas microcuencas reconocen a un número reducido de capitales naturales como los más importantes o los que más emplean en su vida cotidiana (Figura 3). En estas comunidades, el reconocimiento del agua y la energía solar como dos de sus principales capitales naturales era de esperarse debido a su estrecha relación con las actividades agrícolas y ganaderas predominantes en esta zona. El agua es esencial para el riego de cultivos, el abastecimiento del ganado y el mantenimiento de los ecosistemas que los rodean. Por otro lado, la energía solar se destaca como una fuente de energía renovable altamente disponible que permite el crecimiento de los cultivos y que influye en los ciclos de vida de los cultivos y en la regulación de los patrones de floración y maduración. Asimismo, en algunas áreas la energía solar también se puede utilizar en la implementación de sistemas de riego automatizados y en la operación de equipos de climatización para invernaderos y sistemas de almacenamiento de productos agrícolas. El reconocimiento de estos recursos naturales como capitales importantes destaca la dependencia de las comunidades agrícolas y ganaderas de ellos para asegurar su sustento y promueve su protección y uso sostenible.

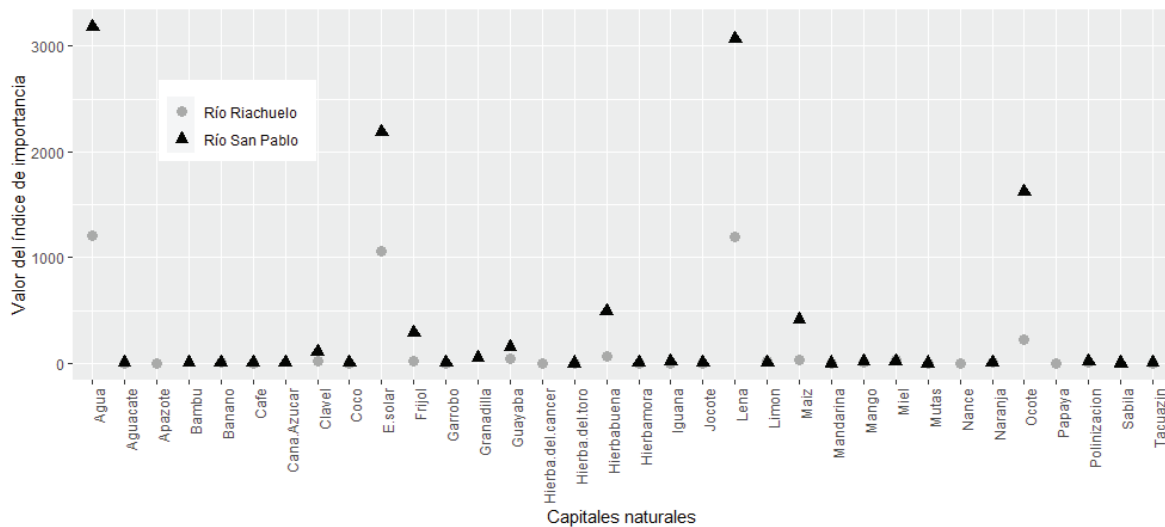


Figura 3. Valor del índice de Importancia Relativa (IR) de los 30 capitales naturales con el valor más alto para ese índice en las cuencas del río Riachuelo y río San Pablo, Zacapa, Zacapa.

En este estudio, la leña y el ocote se reconocen como dos de los capitales naturales más valiosos. En Guatemala, aproximadamente el 70% de los hogares dependen de la leña como principal fuente de energía. Es importante destacar que, en el país, esta necesidad de utilizar leña como combustible es especialmente evidente en las familias más pobres, donde alrededor del 80% del gasto en combustibles se destina a la cocción de alimentos y la calefacción de los hogares. Esta situación refleja la falta de acceso a otras fuentes de energía más limpias y eficientes en muchas áreas rurales, donde la población depende de los recursos naturales locales para satisfacer sus necesidades energéticas básicas.

En particular, el uso ineficiente de la leña, especialmente en fogones abiertos, tiene consecuencias perjudiciales para el medio ambiente, la salud de la población y la economía nacional. La quema inadecuada de leña genera emisiones de gases y partículas contaminantes, contribuyendo a la degradación ambiental y la calidad del aire. Además, existe una estrecha relación entre el consumo de leña y las enfermedades respiratorias, ya que los hogares que la utilizan tienen un 31% más de probabilidad de contraer enfermedades respiratorias agudas o crónicas.

En respuesta a estos desafíos, se pueden implementar diversas estrategias para satisfacer las necesidades energéticas de la población, promover el manejo sustentable del recurso forestal y reducir los problemas de salud asociados con el uso de la madera y ocote. Estas estrategias pueden incluir el establecimiento y manejo de plantaciones forestales y sistemas agroforestales con fines energéticos, la implementación de estufas eficientes de leña que mejoren la combustión y la creación de equipos promotores locales para la producción y uso eficiente de la leña.

Por otro lado, el hecho de que las comunidades reconozcan y utilicen ciertos capitales naturales de manera frecuente indica que existe una conciencia y valoración de su importancia. Esto puede ser un primer paso hacia la conservación, ya que las personas tienden a proteger y cuidar lo que valoran y consideran importante para su bienestar y sustento. Cuando las comunidades reconocen y utilizan ciertos capitales naturales, es más probable que estén dispuestas a participar en actividades para su conservación y protección. Pueden estar motivadas para colaborar en la implementación de prácticas sostenibles, la adopción de medidas de gestión adecuadas y la promoción de políticas que protejan esos capitales naturales.

El hecho de que las comunidades y las familias reconozcan ciertos capitales naturales como fundamentales también puede crear una base sólida para la gobernanza local y la toma de decisiones participativas. Las comunidades pueden estar más dispuestas a involucrarse en la gestión de esos capitales naturales y tener un papel activo en la formulación de políticas y regulaciones que aseguren su protección y uso sostenible. Ahora bien, si los capitales naturales reconocidos y utilizados con mayor frecuencia no se gestionan adecuadamente, existe el riesgo de sobreexplotación. El uso intensivo y no sostenible de estos recursos puede agotarlos o degradarlos, lo que a largo plazo puede tener efectos negativos en la disponibilidad y calidad de los capitales naturales, así como en el sustento de las comunidades. Esto también muestra la necesidad de implementar un manejo integral de estos recursos que no puede basarse únicamente en la perspectiva de las comunidades. Es necesario adoptar enfoques integrales que tengan en cuenta los aspectos ecológicos, socioeconómicos y culturales. La colaboración entre las comunidades, las instituciones locales, los expertos y las partes interesadas es fundamental para desarrollar estrategias de conservación efectivas y equilibradas.

Interacción, diferencias y similitudes en el uso de capitales entre las comunidades de la microcuenca del Río el Riachuelo y San Pablo

En relación a las similitudes en la composición de los capitales naturales utilizados por las comunidades, se observa en el dendrograma la formación de dos grupos a lo largo de las cuencas evaluadas (Fig. 4). El primer grupo incluye todas las comunidades del Río San Pablo, así como dos comunidades del Río Riachuelo (El Zarzal y Cerro Pelón). Por otro lado, se forma un segundo grupo con las comunidades restantes del Río Riachuelo. Este patrón refleja que, aunque las comunidades utilizan un número similar y una variedad de capitales naturales, factores como su ubicación geográfica, así como la distribución y disponibilidad de recursos, pueden influir en qué capitales naturales emplean a lo largo de estas cuencas. Se observa que las dos comunidades del Río Riachuelo que se agruparon con las de San Pablo están ubicadas en la parte baja de la cuenca, donde se agrupan con las otras cuencas de la parte baja de San Pablo. Esta área baja está dominada por vegetación de baja montaña y bosque seco. Esto podría estar afectando la disponibilidad y distribución de los recursos utilizados por estas comunidades.

El hecho de que varias comunidades compartan los mismos capitales naturales crea una interdependencia entre ellas. Esto significa que las acciones de una comunidad pueden tener un impacto directo en la disponibilidad y calidad de los recursos para otras comunidades. Por ello es importante que exista una gestión y colaboración adecuada entre las comunidades para garantizar una distribución equitativa y sostenible de los recursos naturales. Además, si estas comunidades dependen de los mismos capitales naturales y estos se ven amenazados, todas las comunidades pueden experimentar una vulnerabilidad compartida. Por ejemplo, si un ecosistema es degradado o destruido, las comunidades que dependen de él sufrirán los efectos negativos en términos de seguridad alimentaria, salud e incluso bienestar emocional.

Por otro lado, si algunas comunidades tienen diferentes capitales naturales, también pueden surgir complicaciones significativas. Por ejemplo, si algunas comunidades tienen acceso a una diversidad de capitales naturales mientras que otras carecen de ellos, se puede generar una desigualdad en términos de oportunidades y calidad de vida. Aquellas comunidades con menos recursos naturales pueden estar en desventaja en términos de seguridad alimentaria o salud emocional. Esto también puede causar dependencia a fuentes externas para obtener estos recursos que de otra manera obtendrían directamente de la naturaleza que les rodea. Esto último puede hacerlas más vulnerables a factores como los cambios en los precios de los productos, la disponibilidad limitada de recursos o la dependencia de la ayuda externa [16].

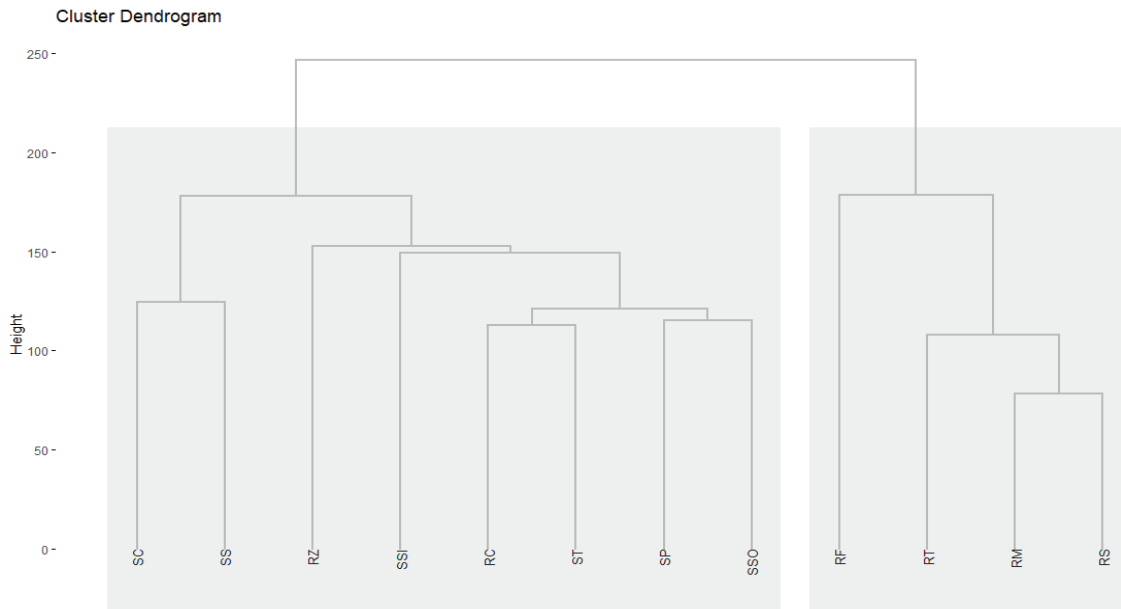


Figura 4. Dendrograma de agrupamiento utilizado para detectar grupos de comunidades en base a su similitud en cuanto el tipo de capital natural que emplean y en base a cuantas familias dentro de esas comunidades indicar emplear ese tipo de capital natural. Los cuadros con línea discontinua muestran las dos ramas o grupos dentro del dendrograma. Para conocer nombre abreviado de comunidades consultar material complementario 1.

Debido a estas implicaciones es esencial que las comunidades que comparten los mismos capitales naturales trabajen en conjunto en la planificación y toma de decisiones sobre el uso y conservación de estos recursos. Esto implica establecer mecanismos de gobernanza participativa que promuevan la colaboración, el diálogo y la negociación entre las partes interesadas. La participación de las comunidades locales, los líderes comunitarios, las organizaciones no gubernamentales y las instituciones gubernamentales es fundamental para garantizar una gestión equitativa y sostenible de los capitales naturales [17].

También es necesario llevar a cabo evaluaciones periódicas del uso y estado de los capitales naturales compartidos para comprender su estado, su capacidad de carga y las tendencias de cambio que pueden darse a través del tiempo. Esto puede incluir monitoreo de la calidad del agua, análisis del suelo, inventarios de hierbas silvestres y plantas medicinales, monitoreo de mamíferos y aves cinegéticas, entre otros. Estos datos científicos y conocimientos tradicionales locales pueden servir como base para la toma de decisiones informadas y adaptativas [18].

Las comunidades de estas cuencas también pueden establecer acuerdos y regulaciones compartidas para garantizar una distribución equitativa y sostenible de sus capitales naturales. Esto puede implicar la creación de reservas naturales comunitarias, parques regionales municipales o reservas naturales privadas, zonas de uso sostenible, cuotas de extracción, derechos de acceso, entre otros. En Guatemala existen muchos ejemplos de este tipo de estrategias. Estos acuerdos deben basarse en el consenso y la equidad, teniendo en cuenta las necesidades y aspiraciones de todas las comunidades involucradas. En relación a esto último, el CONAP indica por ejemplo que las reservas o parques regionales pueden contribuir a cumplir con diferentes objetivos como el mantener muestras representativas de cada región biológica importante, proteger y mantener tipos de comunidades naturales, paisajes y rasgos fisiográficos particulares de una zona, conservar el material genético y evitar pérdida de especies,

proporcionar medios y oportunidades para educación, investigación y monitoreo, mantener y manejar cuencas hidrográficas, mantener los recursos forestales, e incluso proporcionar oportunidades para recreación de la personas en esa región en particular [19].

Por otro lado, la educación ambiental y la sensibilización son fundamentales para promover la conservación y la sostenibilidad de los recursos naturales compartidos. Es importante educar a las comunidades sobre la importancia de la conservación, los impactos de la degradación de los recursos y las prácticas sostenibles. Esto puede incluir programas de capacitación, talleres, campañas de divulgación y la promoción de prácticas tradicionales de manejo de recursos [17]. Finalmente, en algunos casos, puede ser beneficioso establecer mecanismos de cooperación y colaboración a nivel regional. Esto implica trabajar con otras comunidades y actores relevantes en la región para abordar los desafíos comunes y promover la gestión sostenible de los recursos naturales compartidos. Las alianzas regionales pueden fortalecer la capacidad de respuesta, el intercambio de conocimientos y la implementación de mejores prácticas.

Razones para la conservación y valores intrínsecos de los capitales naturales empleados de las comunidades en estudio

En general, se puede hablar de dos visiones para valorar los capitales naturales, una visión ecocéntrica y otra antropocéntrica. La primera es de carácter ético o moral, y se fundamenta en el derecho inalienable que todos los organismos vivos tienen a la existencia (IUCN, 1992). La segunda es de carácter utilitarista basada en la existencia de beneficios hacia el humano identificables, directos o indirectos, actuales o potenciales, derivados de la conservación; unos beneficios que pueden ser materiales, culturales o anímicos [20]. En el caso de este estudio, según se observa en la Figura 5, la mayoría de las personas entrevistadas en ambas microcuencas muestran una apreciación de los capitales naturales basada en características utilitarias o antropocéntricas de los recursos. Esto sugiere que valoran principalmente estos capitales por su capacidad para satisfacer necesidades y obtener beneficios tangibles. Los recursos naturales, como alimentos, agua limpia, aire, materiales de construcción, medicinas y energía, son altamente valorados debido a su impacto directo en el bienestar de las personas y sus familias. Esta perspectiva destaca el interés propio y la relación directa entre los recursos naturales y el bienestar personal. Estos hallazgos tienen importantes implicaciones en la intersección de la ecología y la sociedad, destacando la importancia de comprender cómo los recursos naturales son percibidos y valorados por las comunidades locales en función de su utilidad y beneficios tangibles. En relación a esto último,

En ambos grupos de comunidades, algunas personas enfatizan no sólo el valor utilitario, sino también valores intrínsecos como el respeto a la naturaleza y el principio de sostenibilidad. Aunque en menor proporción, estas personas muestran una conexión con el entorno natural y una valoración de la biodiversidad que los rodea. Esta motivación ambiental puede impulsar la protección de los servicios ecosistémicos en las microcuencas, ya que reconocen que estos servicios son fundamentales para mantener la salud de los ecosistemas y la diversidad de especies, no solo para su propio bienestar y el de sus familias. Es importante destacar también que varios entrevistados mencionaron que la conservación de los capitales naturales debe ser sostenible, ya que consideran que es un legado de beneficios para las futuras generaciones, incluyendo a sus propios hijos.

El análisis de las palabras clave en el diagrama de Venn revela tanto palabras exclusivas como compartidas entre las comunidades, lo que permite comprender mejor las razones por las cuales algunos recursos naturales son más apreciados que otros (Fig. 6). Un alto porcentaje de palabras clave son compartidas entre ambos grupos de comunidades, lo que refleja similitudes en las motivaciones para la conservación de los capitales naturales que utilizan. Esto puede ser una herramienta para lograr impulsar la conservación basada en estas motivaciones.

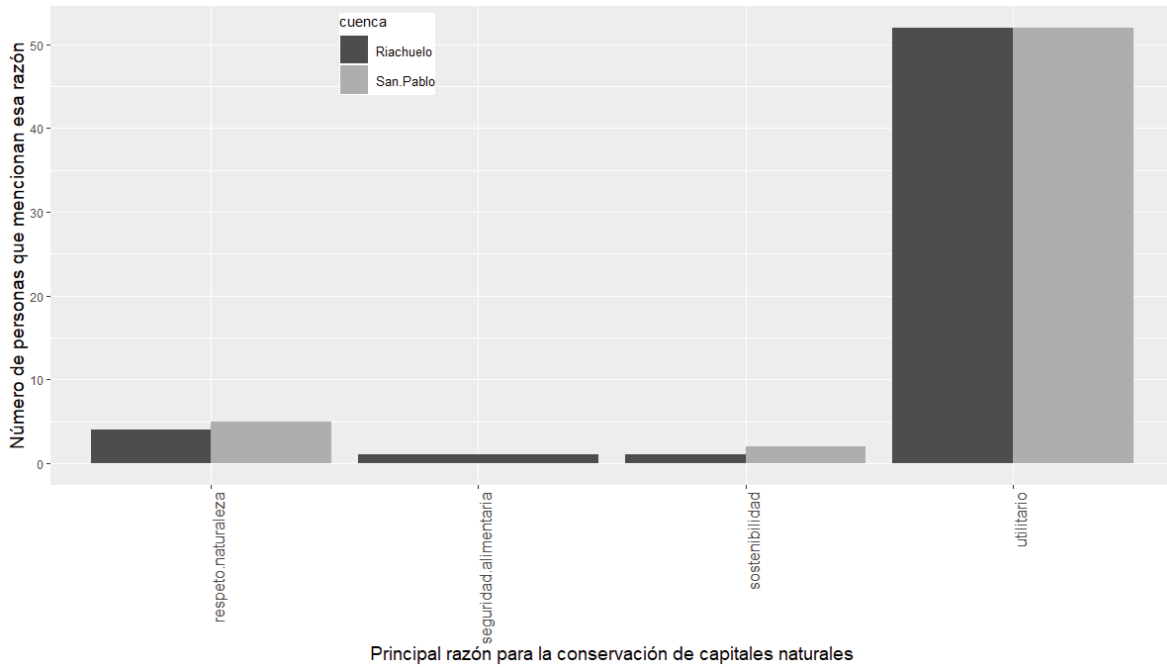


Figura 5. Número de personas del total de entrevistados que mencionan valores intrínsecos que los motivan a la conservación de capitales naturales en las cuencas del Río Riachuelo y Río San Pablo.

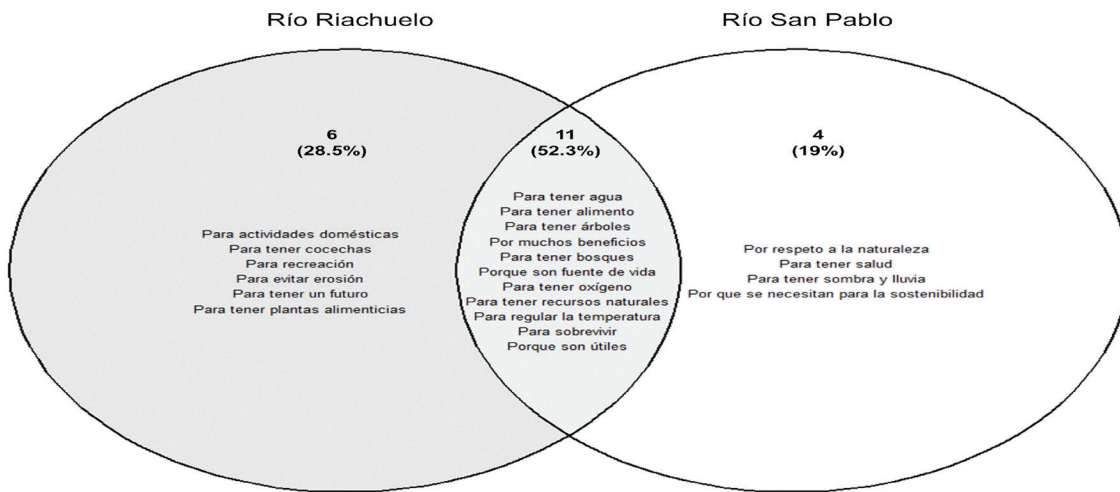


Figura 6. Diagrama de Venn que muestra palabras clave exclusivas o compartidas, que las personas de las comunidades en estudio mencionaron como su principal razón para conservar las capitales de las microcuencas Riachuelo y San Pablo.

No obstante, también se identificaron palabras clave exclusivas en el discurso de apreciación de cada una de las comunidades, lo que indica diferentes impulsos para la conservación. Por ejemplo, en la comunidad Riachuelo se menciona la importancia recreativa de los bosques, lo que indica que este recurso desempeña un papel relevante en términos de entretenimiento y actividades de ocio para sus habitantes. Por otro lado, en la comunidad de San Pablo, se resaltan motivaciones específicas para la conservación como la obtención de plantas alimenticias, la regulación de la temperatura, la sombra, la lluvia y el mantenimiento de la vida.

Es interesante señalar que ninguna persona mencionó ser motivada por valores culturales o tradiciones, lo cual suele ser común en otras comunidades de América, donde la apreciación y el impulso de conservar ciertos recursos están arraigados en su cultura y tradiciones. Por ejemplo, ciertas prácticas agrícolas sostenibles pueden ser valoradas como parte de la identidad cultural y transmitidas de generación en generación. Sin embargo, en la cuenca del Río Riachuelo, una persona destacó que uno de los valores que impulsaba la conservación de los recursos era alcanzar la seguridad alimentaria, enfocados en asegurar la disponibilidad de alimentos para las poblaciones a lo largo del tiempo.

Las diferencias que se encontraron entre ambos conjuntos de comunidades podrían atribuirse a las características geográficas, climáticas o culturales particulares de cada microcuenca, que influyen en la percepción y necesidades específicas de los recursos naturales en esas comunidades.

Conclusiones

El uso de capitales naturales, especialmente de origen vegetal, es de gran importancia para las comunidades de ambas cuencas. Los frutos, semillas y hierbas son los recursos naturales más utilizados por estas comunidades. Estos recursos desempeñan un papel crucial en la alimentación de las familias, así como en actividades económicas y medicinales. Por lo tanto, la conservación de estos recursos es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria, la salud y el bienestar de las comunidades rurales del área de estudio.

La caza de animales como los garrobos e iguanas, que forman parte de la tradición cultural y alimentaria de estas comunidades, requiere una gestión adecuada para evitar consecuencias negativas en términos de biodiversidad y seguridad alimentaria. Es necesario establecer regulaciones y prácticas sostenibles para la caza de animales cinegéticos, como la implementación de límites de caza, la creación de áreas de caza protegidas y la promoción de prácticas de caza responsable. Además, la difusión de información sobre los calendarios cinegéticos elaborados por entidades como CONAP es crucial para garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales y la seguridad alimentaria de las poblaciones locales.

En este estudio destacamos que, si bien la utilidad y la sostenibilidad son aspectos fundamentales, también es necesario fomentar una mayor conciencia sobre el respeto y la conexión intrínseca con la naturaleza en las comunidades rurales del oriente del país. Promover valores como la conservación, la preservación y la armonía con el entorno natural puede contribuir a fortalecer la relación entre las comunidades y los recursos naturales, fomentando una gestión más responsable y consciente.

Este trabajo destaca la importancia de los capitales naturales para las comunidades rurales de los ríos Riachuelo y San Pablo en Guatemala. El conocimiento de los recursos naturales utilizados por estas comunidades permite sugerir estrategias de conservación que promuevan prácticas agrícolas sostenibles, protección de hábitats de polinizadores y gestión responsable de la caza de animales cinegéticos. Estas medidas contribuirán a preservar la biodiversidad, garantizar la seguridad alimentaria y promover el bienestar a largo plazo.

Además, el estudio ha demostrado que en ambas microcuencas existe un reconocimiento por parte de la mayoría de las familias hacia un número reducido de capitales naturales considerados como los más importantes o los más utilizados en su vida cotidiana. El agua y la energía solar se destacan como dos de las principales capitales naturales en estas comunidades debido a su estrecho vínculo con las actividades agrícolas y ganaderas predominantes en la zona. Sin embargo, se observó que el uso ineficiente de la leña y el ocote plantea desafíos ambientales, de salud y económicos, a pesar de ser reconocidos como capitales naturales valiosos.

Por tanto, la conservación de estos capitales naturales, junto con la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, la protección de hábitats de polinizadores y la gestión responsable de la caza de animales cinegéticos, debe ser la base para las estrategias de conservación a fin de garantizar la preservación de la biodiversidad, la seguridad alimentaria y el bienestar de las comunidades rurales a largo plazo.

Finalmente, los resultados de este estudio revelan que la apreciación de los recursos naturales en estas comunidades se fundamenta principalmente en su utilidad y en la consideración de la sostenibilidad a largo plazo, con un porcentaje reducido destacando el respeto hacia la naturaleza. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender las motivaciones y valores de las comunidades locales al desarrollar estrategias de conservación de los servicios ecosistémicos en las microcuencas. La comprensión de estas motivaciones y valores es crucial para garantizar la efectividad de las medidas de conservación y promover la participación activa de las comunidades en la gestión sostenible de los recursos naturales. Al considerar las necesidades y perspectivas de las comunidades locales, se pueden diseñar estrategias más efectivas que promuevan tanto el bienestar humano como la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Referencias

- [1] J. Sánchez, R. Domínguez, M. León, J. Samaniego, and O. Sunkel, *Recursos naturales , medio ambiente y sostenibilidad Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL*. 2019.
- [2] D. Urte, "La valoración cultural, social y turística de los recursos culturales y naturales como instrumento para la planificación turística, la conservación del paisaje cultural cafetero y el desarrollo sostenible del territorio turístico," *Tur. y Soc.*, vol. 8, pp. 69–79, 2007, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=576261178004>.
- [3] E. Pérez, A. Ramos-Rodriguez, and H. Vargas-Rodriguez, "La participación comunitaria en la conservación del medioambiente: clave para el desarrollo local sostenible," *La participación comunitaria en la conservación del medioambiente: clave para el desarrollo local sostenible*, 2014. <https://www.eumed.net/rev/delos/21/conservacion.html>.
- [4] E. Pineda-Posadas, U. Bá-Velásquez, J. Morales-Álvarez, J. Pellecer-González, M. Ortiz-De León, and R. Tox-Cao, "Uso y conocimiento de la fauna silvestre de la comunidad q'eqchi' de Santa Lucía Lachúa, Alta Verapaz, Guatemala: un abordaje etnozoológico," *Ciencias Soc. y Humanidades*, vol. 8, no. 1, pp. 7–24, 2021, doi: 10.36829/63chs.v8i1.1106.
- [5] M. D. S. Lara López, "Alimentación De La Iguana Verde Iguana (Squamata: Iguanidae) En La Mancha, Veracruz, México," *Acta Zoológica Mex.*, vol. 152, no. 85, pp. 139–152, 2002, doi: 10.21829/azm.2002.85851818.
- [6] E. Secaira, P. Prado, and S. Pérez, "Plan de conservación de la región semiárida del Valle del Motagua," 2003.
- [7] CONAP, "Elaboración de los calendarios cinegéticos regionales 2010. Informe Final," 2010.
- [8] S. A. M. Khalifa *et al.*, "Overview of Bee Pollination and Its Economic Value for Crop Production," pp. 1–23, 2021.
- [9] K. Reddy and Kumar Veeresh, "Strategies for Conservation of Wild bees," no. February, 2021, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/349027861_Strategies_for_Conservation_of_Wild_bees_General_Article.

- [10] S. Curtin, "Wildlife tourism: The intangible, psychological benefits of human-wildlife encounters," *Curr. Issues Tour.*, vol. 12, no. 5–6, pp. 451–474, 2009, doi: 10.1080/13683500903042857.
- [11] A. D. C. Cuéllar, J. L. C. Burguete, and L. Ruiz-Montoya, "Educar con ética y valores ambientales para conservar la naturaleza," *Convergencia*, vol. 16, no. 50, pp. 353–382, 2009.
- [12] A. G. Chaves, P. C. Brunetti, Y. Massuh, S. F. Ocaño, L. E. Torres, and M. S. Ojeda, "Variability of *Baccharis crispa* Spreng. wild populations in the Province of Córdoba, Argentina," *Phyton-International J. Exp. Bot.*, vol. 83, pp. 145–153, 2014, doi: 10.32604/phyton.2014.83.145.
- [13] S. L. Chen, H. Yu, H. M. Luo, Q. Wu, C. F. Li, and A. Steinmetz, "Conservation and sustainable use of medicinal plants: Problems, progress, and prospects," *Chinese Med. (United Kingdom)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1186/s13020-016-0108-7.
- [14] A. Grijalva-Pineda, *Flora útil. Etnobotánica de Nicaragua*, 1ra ed. Managua: MARENA, 2016.
- [15] L. Meza and A. Rodríguez, "Soluciones basadas en la naturaleza para la sostenibilidad de la agricultura: ruta para la sinergia entre las convenciones de Río y la recuperación pos-COVID-19," 2021. [Online]. Available: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/48052/1/S2200214_es.pdf.
- [16] J. Elbers, *Las áreas protegidas de América Latina Situación actual y perspectivas para el futuro*. Quito, Ecuador, 2011.
- [17] J. Srukhán *et al.*, *Síntesis Capital Natural de México*. México, 2017.
- [18] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales -SEMARNAT-, "La gestión ambiental en México," México, 2006.
- [19] Consejo Nacional de Áreas Protegidas -CONAP-, "Guía para el registro de áreas protegidas municipales en el CONAP," 2006.
- [20] L. García-Leyton, "Programa de Doctorado de Ingeniería Ambiental Tesis Doctoral Aplicación del Análisis Multicriterio en la Evaluación de Impactos Ambientales Luís Alberto García Leyton," Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos que hemos utilizado una herramienta de Inteligencia Artificial (IA) *ChatGPT* para asistirnos en la redacción de este artículo. Esta herramienta nos ayudó a mejorar la estructura y la claridad del texto. Los contenidos generados por la IA fueron revisados minuciosamente por nosotros para asegurar su precisión y coherencia con el objetivo del estudio.

Papel del Mioinositol en la regulación hormonal femenina y el Síndrome de Ovario Poliquístico

The Role of Myo-Inositol in the regulation of female hormones and Polycystic Ovary Syndrome

Hazel Johanna Martínez-Loría¹, Lester Fabian Vargas-Zúñiga², Joshua Andrey González-Vargas³, Kristel Mariana Cordero-Robles⁴, María José Urrea-Mayorga⁵

Fecha de recepción: 13 de noviembre, 2023

Fecha de aprobación: 8 de marzo, 2024

Martínez-Loría, H. J; Vargas-Zúñiga, L. F; González-Vargas, J. A; Cordero-Robles, K. M; Urrea-Mayorga, M. J. Papel del Mioinositol en la regulación hormonal femenina y el Síndrome de Ovario Poliquístico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 133-140.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6939>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 hazel.martilo@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0002-0267-8942>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 levargas@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0006-6962-9191>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 jos01gonzalez@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0002-7337-1200>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 kristelm.cordero@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0000-0559-6446>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 mariaurrea@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-9127-3595>

Palabras clave

D-quiroinositol; resistencia a la insulina; hiperandrogenismo; GLUT 4; infertilidad; hiperinsulinemia; metformina.

Resumen

Los inositoles son hexahidroxiciclohexanos conformados por nueve estereoisómeros, la mayoría biológicamente activos. La presente revisión pretende recapitular los principales efectos del mioinositol (MI) sobre las características patológicas del síndrome de ovario poliquístico (SOP) y su papel como regulador en la respuesta hormonal y bioquímica femenina. Las pacientes con SOP presentan trastornos clínicos, hormonales, metabólicos y fisiológicos que requieren tratamiento especializado a largo plazo. Por su parte, el inositol ha demostrado ser efectivo para reducir la severidad de los síntomas, regular la función menstrual y mejorar el perfil hormonal controlando parámetros metabólicos, por lo que su administración representa una opción efectiva para el manejo de los síntomas del SOP. A pesar de esto, existen limitaciones para los estudios como el hecho de que, al tratarse de un síndrome, el SOP es una condición heterogénea con una amplia variedad de síntomas y manifestaciones clínicas, por lo que también implica variedad de respuesta en las pacientes al MI. En los últimos años, su investigación ha generado evidencia terapéutica prometedora, pero aún falta abarcar más estudios controlados y doble ciego para definir su efecto según los fenotipos del SOP, así como investigaciones a largo plazo que evalúen la seguridad y eficacia del tratamiento en períodos prolongados. De manera general, el MI representa una alternativa efectiva y segura para el tratamiento del SOP, mostrando resultados similares a los presentados por otros tratamientos sin la presencia de los efectos secundarios conocidos.

Keywords

D-chiro-inositol; insulin resistance; hyperandrogenism; GLUT 4; infertility; hyperinsulinism; metformin.

Abstract

Inositols are hexahydroxycyclohexanes formed by nine stereoisomers, most of them biologically active. The present review aims to recapitulate the main effects of myo-inositol (MI) on the pathological characteristics of polycystic ovary syndrome (PCOS) and its role as a regulator of the female hormonal and biochemical response. Patients with PCOS present clinical, hormonal, metabolic and physiological disorders that require specialized long-term treatment. For its part, inositol has been shown to be effective in reducing the severity of symptoms, regulating menstrual function, and improving the hormonal profile by controlling metabolic parameters, so its administration represents an effective option for the management of symptoms of PCOS. Despite this, there are limitations in the studies such as, being a syndrome, PCOS is a heterogeneous condition with a wide variety of symptoms and clinical manifestations, which is why it also implies a variety of responses in patients to MY treatment. In recent years, their research has generated promising therapeutic evidence, but there is still a need to cover more controlled and double-blind studies to define its effect according to PCOS phenotypes, as well as long-term research that evaluates the safety and effectiveness of the treatment over periods of time. Prolonged. In general, MI represents an effective and safe alternative for the treatment of PCOS, showing results like those presented by other treatments without the presence of known side effects.

Introducción

Los inositoles son polialcoholes con una estructura de anillo de seis carbonos hidroxilados y conforman una familia de nueve estereoisómeros [1]. Varios de estos son biológicamente activos, como el mioinositol (MI-cis-1,2,3,5-trans-4,6-ciclohexanehexol), que es ampliamente distribuido en la naturaleza y el más abundante en los humanos [2]. El MI puede obtenerse de frutas, frijoles, maíz, cereales y nueces [1], además de sintetizarse activamente en el cuerpo humano [3]. Sus funciones incluyen servir como mensajero en la transducción de señales, participar en las vías bioquímicas dentro de los ovocitos, componente de fosfolípidos, entre otras [2, 4].

Actualmente, el inositol ha sido partícipe en el tratamiento de diferentes enfermedades metabólicas debido a su relación con la translocación de GLUT4 a la membrana plasmática y el ciclo de Krebs [5]. De forma específica, el inositol se ha usado en el tratamiento de la enfermedad vascular causada por el fenómeno de Raynaud [6, 7] y para tratar complicaciones de la enfermedad renal terminal [8, 9]. También se prescribe como tratamiento de enfermedades dérmicas [1], psiquiátricas como el trastorno bipolar [11] y puede prevenir el crecimiento tumoral mediado por el receptor del factor de crecimiento de insulina-1 [12].

Así mismo, el síndrome de ovario poliquístico (SOP), puede ser tratado con MI. El SOP se define como un trastorno ginecológico endocrino común que afecta a más del 13% de mujeres en edad reproductiva, desencadenando trastornos menstruales y complicaciones reproductivas, metabólicas, enfermedades cardiovasculares y efectos fisiológicos como ansiedad, depresión y trastornos alimenticios [13, 14].

La presente revisión, recopila los principales efectos del MI sobre las características patológicas del SOP y su papel como regulador en la respuesta hormonal y bioquímica femenina.

Biosíntesis del Mioinositol

Debido a que puede ser producido en cantidad suficiente por el cuerpo humano a partir de d-glucosa, no se considera como una molécula esencial [15, 16]. Las células normalmente obtienen MI de tres fuentes: (1) biosíntesis *de novo* a partir de glucosa-6-fosfato por 1-d-mioinositol-fosfato sintasa (MIPS) e inositol monofosfatasa (IMPasa), (2) desfosforilación de fosfatos de inositol derivados de la descomposición de fosfolípidos de membrana que contienen inositol; o (3) absorción del líquido extracelular a través de transportadores de MI [17].

Específicamente, el MI se puede sintetizar endógenamente a partir de d-glucosa en testículos, riñón, cerebro e hígado en tres pasos: la glucosa es fosforilada por la hexoquinasa, la glucosa-6-fosfato se convierte en mio-inositol-1-fosfato por MIPS, y, por último, la mio-inositol-1-fosfato es desfosforilada por IMPasa para producir MI libre [15, 18]. Cabe destacar que el segundo paso es limitante de la velocidad de la biosíntesis de MI en la mayoría de los organismos [18, 20].

En los humanos, la biosíntesis endógena de MI es de gran importancia en el riñón, debido a que produce aproximadamente 2 g/día. Por lo tanto, la producción diaria endógena con ambos riñones sanos es cercana a los 4 g, lo cual es significativamente mayor que la cantidad por la ingesta dietética diaria que se acerca a 1 g/día [18, 20]. Los tejidos extrarrenales también pueden contribuir a la producción endógena de inositol en humanos y, en algunos animales se reporta hasta un 50% de la producción en el cerebro [18, 20].

Sintomatología y tratamientos médicos usados para el SOP

El SOP se caracteriza por desequilibrios hormonales y está asociado con anovulación, aborto e infertilidad. Los pacientes con SOP presentan manifestaciones clínicas que incluyen menstruación irregular, acné, hirsutismo, hiperinsulinemia, resistencia a la insulina, obesidad,

hipertensión y dislipidemia [21]. Las mujeres con SOP también tienen mayores probabilidades de presentar enfermedades psiquiátricas, particularmente depresión, ansiedad, bulimia, y trastornos bipolares [22].

El SOP se asocia con obesidad en aproximadamente 80% de los casos, y en alrededor del 30-40% de los casos, también se relaciona con síndrome metabólico caracterizado por resistencia a la insulina [23]. La resistencia a la insulina conduce a hiperglucemia, lo que, a su vez, disminuye la producción de globulina fijadora de hormonas sexuales (SHBG) en el hígado, lo que resulta en un aumento de los niveles de andrógenos en el torrente sanguíneo [24, 25]. Por tanto, el abordaje de esta resistencia a la insulina se convierte en un componente esencial en el tratamiento del SOP, y por lo general se basa en pautas nutricionales, actividad física y moléculas como el MI [25].

El hiperandrogenismo o sobreproducción de andrógenos es un signo distintivo del SOP y, a menudo, es lo que lleva a los pacientes a buscar atención. Se manifiesta como acné, hirsutismo o alopecia [26]. La mayoría de las pacientes con SOP tienen sobrepeso u obesidad, destacando el metabolismo anormal de los lípidos en la patogénesis de SOP, lo que a su vez puede conducir al hiperandrogenismo, la resistencia a la insulina, e infertilidad [27].

Dentro de los tratamientos usados para el SOP, están las estatinas (Atorvastatina, simvastatina y lovastatina) que se usan para reducir la inflamación, el estrés oxidativo, la hiperandrogenemia, mejorar la ciclicidad menstrual, reducir el acné, entre otros [28]. Las estatinas inhiben la HMG-CoA reductasa encargada de producir mevalonato, intermediario en la síntesis del colesterol, un intermediario en la síntesis de colesterol y de otros lípidos importantes [29]. Por lo tanto, las estatinas pueden mejorar el estado lipídico y el hiperandrogenismo en estos pacientes [29].

Mioinositol como alternativa para el tratamiento de SOP

Los mecanismos de acción del MI se fundamentan en la mejora de la sensibilidad a la insulina en los tejidos, lo cual tiene un impacto positivo en el sistema reproductivo (restableciendo la ovulación y mejorando la calidad de los ovocitos) y las funciones hormonales (reduciendo el exceso de andrógenos y la dislipidemia), así como disminuyendo los niveles de insulina en la sangre [30]. Por ejemplo, el MI reduce la cantidad de hormona foliculoestimulante (FSH) necesaria durante la estimulación ovárica, lo que aumenta las posibilidades de embarazo [31].

En un estudio de 12 semanas con 50 mujeres con sobrepeso y SOP, el uso de 2 g/día de MI (junto con 200 mcg de ácido fólico) resultó en reducciones significativas en varias hormonas, incluyendo la hormona luteinizante (LH), prolactina, testosterona e insulina, así como una mejora en la sensibilidad a la insulina [32]. También se observó mejoras en la tasa de parto y el restablecimiento del ciclo menstrual en mujeres con amenorrea u oligomenorrea [33, 34].

Otra investigación reveló que aproximadamente el 61.7% de las pacientes diagnosticadas con SOP experimentaron ovulación después de recibir tratamiento con MI [35]. Diversos metaanálisis de ensayos controlados aleatorios confirman la eficacia tanto de la monoterapia con MI como de su combinación con inhibidores de *Dopa*-Decarboxilasa en pacientes con SOP [36]. También se ha reportado que el uso de MI es beneficioso tanto para mujeres con SOP como para aquellas sin esta condición, especialmente cuando se someten a procedimientos de fertilización *in vitro* [37]. Estos hallazgos respaldan el papel potencialmente beneficioso del MI en el tratamiento de la infertilidad asociada con el SOP en otros contextos de reproducción asistida.

El MI ha demostrado ser apropiado y conveniente para reducir la severidad del hiperandrogenismo, regular la función menstrual y mejorar el perfil hormonal controlando parámetros metabólicos. Debido a esto, su administración aislada o en combinación con otros tratamientos representa

una opción efectiva, segura y bien tolerada para el manejo de los síntomas del SOP [38]. Otro inositol importante en este sentido es D-quiro-inositol (DCI), que junto al MI, sirven como mensajeros secundarios en la señalización de insulina mediando diferentes efectos como la activación de transportadores de glucosa (MI) y regulación de la síntesis de glucógeno (DCI) [39].

Greff *et al.* [40] concluyeron que el MI no demostró inferioridad en la mayoría de los resultados comparados con el mejor tratamiento disponible, metformina (MET), con la ventaja de no presentar los efectos adversos asociados a este fármaco. Dichos autores realizaron ensayos controlados aleatorios incluyendo a 1691 mujeres diagnosticadas con SOP bajo el criterio de Rotterdam, de las cuales, 806 fueron tratadas con inositol, 311 con placebo y 509 con MET [40]. El estudio tuvo como resultado primario la mejora de la función ovárica y normalización del ciclo menstrual, y como resultados secundarios, la tasa de embarazos (número de embarazos en los grupos estudiados), mejora en el índice de masa corporal (IMC), metabolismo de carbohidratos (niveles de glucosa e insulina en ayunas, tolerancia a glucosa oral, resistencia a la insulina) e hiperandrogenismo clínico [40].

Por otra parte, existe evidencia de que los pacientes tratados con 2 g de MI diarios por 6 meses restauraron su actividad ovárica y subsecuentemente la fertilidad [39]. Se mostró la efectividad del MI mejorando parámetros hormonales y fisiológicos, apoyando la idea de que una dosis en proporción 40:1 de MI y DCI es la mejor opción para restaurar la ovulación. Sin embargo, estudios adicionales son necesarios para evaluar los efectos del aumento de DCI sobre la fertilidad asociada a la calidad de los blastocistos [39, 40]

Limitaciones del uso de MI

El uso del inositol como tratamiento para el SOP ha demostrado ser muy beneficioso en aspectos como la regulación hormonal y la homeostasis de la glucosa [3], sin embargo, presenta algunas limitaciones [1, 4]. Al tratarse de una condición heterogénea con una amplia variedad de síntomas y manifestaciones clínicas, no todas las pacientes con SOP responderán de la misma forma al MI [4]. Según Kamenov & Gateva [3], entre el 25% y el 75% de las pacientes con SOP pueden ser resistentes a este tratamiento. El motivo de esto se desconoce, pero se asume que podría estar relacionado con el grado de obesidad, de resistencia a la insulina, entre otras [3].

Por otro lado, los resultados entre estudios son variables. Por ejemplo, en pacientes con obesidad, algunos de los efectos beneficiosos del MI se atenuaron y hubo una relación inversa entre el IMC y el tratamiento, mientras que, otros estudios muestran resultados en que la administración de MI es más eficaz en pacientes obesas, contribuyendo a la disminución de su IMC [1]. Otras limitaciones importantes incluyen variables como la dieta, el ejercicio y otros hábitos, que no siempre se controlan adecuadamente ni de manera homogénea entre pacientes, lo que puede afectar la interpretación de los resultados [41]. Lo anterior sugiere que se debe optar por una dosificación personalizada debido a la heterogeneidad de los casos.

Implicaciones de los hallazgos en la práctica clínica

En los últimos años, la investigación sobre el uso farmacológico del MI ha ido en aumento [2]. Los resultados preliminares muestran un efecto positivo de la administración de inositoles en el perfil clínico y metabólico de pacientes con SOP [4]. La mejora en las concentraciones séricas de andrógenos, de la proporción LH-FSH y la regularización de los ciclos menstruales, pueden favorecer el aumento de la fertilidad en pacientes con SOP, mejorando la calidad de los ovocitos y embriones [4]. Además, el MI puede actuar como alternativa a la MET, el fármaco

antidiabético más popular, ya que MI no muestra los efectos adversos de la MET como los efectos gastrointestinales [2]. Por tanto, el tratamiento con MI se ha convertido en un método novedoso y conveniente para contrarrestar los síntomas del SOP [3].

Por otra parte, a futuro se debe tomar en cuenta la falta de más estudios controlados doble ciego para definir su efecto según los diferentes fenotipos del SOP, ya que cada uno tiene características metabólicas y clínicas muy peculiares [4]. Se requieren estudios adicionales para evaluar las tasas de embarazo clínico y nacidos vivos en este tratamiento [1], tomando en cuenta la tasa de respuesta en aspectos como perfil hormonal y metabólico [3, 42]. Así mismo, falta investigaciones a largo plazo que evalúen la seguridad y eficacia del tratamiento en períodos prolongados [42].

Conclusiones

El MI representa una alternativa efectiva y segura para el tratamiento del SOP, mostrando resultados similares a los obtenidos con el consumo de MET y con menos efectos adversos conocidos. La evidencia disponible indica que el MI mejora la actividad ovárica, la fertilidad, el perfil clínico y metabólico, parámetros hormonales y fisiológicos de las mujeres que padecen el SOP. Así mismo, son necesarios estudios sobre la heterogeneidad de síntomas, el impacto de la dieta, salud general y del IMC de los pacientes en su respuesta al tratamiento con MI.

Referencias

- [1] P. Merviel *et al.*, «Impact of myo-inositol treatment in women with polycystic ovary syndrome in assisted reproductive technologies», *Reprod. Health*, vol. 18, n.º 1, p. 13, ene. 2021, doi: 10.1186/s12978-021-01073-3.
- [2] D. R. Chhetri, «Myo-Inositol and Its Derivatives: Their Emerging Role in the Treatment of Human Diseases», *Front. Pharmacol.*, vol. 10, 2019, Accedido: 2 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphar.2019.01172>
- [3] Z. Kamenov y A. Gateva, «Inositols in PCOS», *Molecules*, vol. 25, n.º 23, Art. n.º 23, ene. 2020, doi: 10.3390/molecules25235566.
- [4] I. O. Carmona-Ruiz *et al.*, «Mioinositol en combinación con D-chiro-inositol: resultados preliminares en el tratamiento de primera línea de pacientes con síndrome de ovario poliquístico», *Ginecología y obstetricia de México*, vol. 85, n.º 3, pp. 141-151, 2017.
- [5] I. (Tai-L. Lee, Y.-F. Chang, F. Choi, y A. Bodemer, «Inositol in Dermatologic Diseases», *Acad. J. Health Sci. Med. Balear*, vol. 38, n.º 1, pp. 29-38, 2023.
- [6] K. Y. Su *et al.*, «Vasodilators for primary Raynaud's phenomenon», *Cochrane Database Syst. Rev.*, n.º 5, 2021, doi: 10.1002/14651858.CD006687.pub4.
- [7] W. F. Jackson, «Calcium-Dependent Ion Channels and the Regulation of Arteriolar Myogenic Tone», *Front. Physiol.*, vol. 12, 2021, Accedido: 1 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2021.770450>
- [8] L. J. Lucca, R. M. A. Moysés, y A. S. Lima Neto, «Diagnóstico e tratamento da calcifilaxia de pacientes com doença renal crônica», *Braz. J. Nephrol.*, vol. 43, pp. 665-668, dic. 2021, doi: 10.1590/2175-8239-JBN-2021-S111.
- [9] J. Perelló, P. h. Joubert, M. d. Ferrer, A. z. Canals, S. Sinha, y C. Salcedo, «First-time-in-human randomized clinical trial in healthy volunteers and haemodialysis patients with SNF472, a novel inhibitor of vascular calcification», *Br. J. Clin. Pharmacol.*, vol. 84, n.º 12, pp. 2867-2876, 2018, doi: 10.1111/bcp.13752.
- [10] S. Roseff y M. Montenegro, «Inositol Treatment for PCOS Should Be Science-Based and Not Arbitrary», *Int. J. Endocrinol.*, vol. 2020, p. e6461254, mar. 2020, doi: 10.1155/2020/6461254.
- [11] T. Cantelmi y C. Di Lorenzo, «Chapter 6 - Myo-inositol could restore peripheral inositol depletion induced by treatments for psychiatric and neurological conditions», en *A Clinical Guide to Inositols*, V. Unfer y D. Dewailly, Eds., Academic Press, 2023, pp. 73-85. doi: 10.1016/B978-0-323-91673-8.00003-0.
- [12] S. Dinicola *et al.*, «Inositol induces mesenchymal-epithelial reversion in breast cancer cells through cytoskeleton rearrangement», *Exp. Cell Res.*, vol. 345, n.º 1, pp. 37-50, jul. 2016, doi: 10.1016/j.yexcr.2016.05.007.

- [13] S. Cowan *et al.*, «Lifestyle management in polycystic ovary syndrome – beyond diet and physical activity», *BMC Endocr. Disord.*, vol. 23, n.º 1, p. 14, ene. 2023, doi: 10.1186/s12902-022-01208-y.
- [14] X.-J. Shi, Y. Du, L. Chen, Y.-Y. Chen, M. Luo, y Y. Cheng, «Treatment of polycystic ovary syndrome and its associated psychiatric symptoms with the Mongolian medicine Nuangong Qiwei Pill and macelignan», *J. Ethnopharmacol.*, vol. 317, p. 116812, dic. 2023, doi: 10.1016/j.jep.2023.116812.
- [15] M. L. Croze y C. O. Soulage, «Potential role and therapeutic interests of myo-inositol in metabolic diseases», *Biochimie*, vol. 95, n.º 10, pp. 1811-1827, oct. 2013, doi: 10.1016/j.biochi.2013.05.011.
- [16] G. Carlomagno, M. Nordio, T. T. Chiu, y V. Unfer, «Contribution of myo-inositol and melatonin to human reproduction», *Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol.*, vol. 159, n.º 2, pp. 267-272, dic. 2011, doi: 10.1016/j.ejogrb.2011.07.038.
- [17] R. M. Deranieh y M. L. Greenberg, «Cellular consequences of inositol depletion», *Biochem. Soc. Trans.*, vol. 37, n.º 5, pp. 1099-1103, sep. 2009, doi: 10.1042/BST0371099.
- [18] P. H. Meng *et al.*, «Crosstalks between Myo-Inositol Metabolism, Programmed Cell Death and Basal Immunity in Arabidopsis», *PLOS ONE*, vol. 4, n.º 10, p. e7364, oct. 2009, doi: 10.1371/journal.pone.0007364.
- [19] F. Eisenberg y A. H. Bolden, «Biosynthesis of inositol in rat testis homogenate», *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 12, n.º 1, pp. 72-77, jul. 1963, doi: 10.1016/0006-291X(63)90416-9.
- [20] G. Hauser y V. N. Finelli, «The Biosynthesis of Free and Phosphatide Myo-inositol from Glucose by Mammalian Tissue Slices», *J. Biol. Chem.*, vol. 238, n.º 10, pp. 3224-3228, oct. 1963, doi: 10.1016/S0021-9258(18)48650-4.
- [21] S. Eivazi *et al.*, «The hormone-sensitive lipase C-60G polymorphism is correlated with recurrent spontaneous abortion in women with polycystic ovary syndrome», *Gene Rep.*, vol. 32, p. 101788, sep. 2023, doi: 10.1016/j.genrep.2023.101788.
- [22] C. Brutocao, F. Zaiem, M. Alsawas, A. S. Morrow, M. H. Murad, y A. Javed, «Psychiatric disorders in women with polycystic ovary syndrome: a systematic review and meta-analysis», *Endocrine*, vol. 62, n.º 2, pp. 318-325, nov. 2018, doi: 10.1007/s12020-018-1692-3.
- [23] T. T. Y. Chiu, M. S. Rogers, E. L. K. Law, C. M. Briton-Jones, L. P. Cheung, y C. J. Haines, «Follicular fluid and serum concentrations of myo-inositol in patients undergoing IVF: relationship with oocyte quality», *Hum. Reprod.*, vol. 17, n.º 6, pp. 1591-1596, jun. 2002, doi: 10.1093/humrep/17.6.1591.
- [24] A. Alinezhad y F. Jafari, «The relationship between components of metabolic syndrome and plasma level of sex hormone-binding globulin», *Eur. J. Transl. Myol.*, vol. 29, n.º 2, p. 8196, jun. 2019, doi: 10.4081/ejtm.2019.8196.
- [25] P. Merviel *et al.*, «Impact of myo-inositol treatment in women with polycystic ovary syndrome in assisted reproductive technologies», *Reprod. Health*, vol. 18, n.º 1, p. 13, ene. 2021, doi: 10.1186/s12978-021-01073-3.
- [26] N. O. Francone, T. Ramirez, y C. E. Boots, «Contemporary Management of the Patient with Polycystic Ovary Syndrome», *Obstetrics and Gynecology Clinics of North America*, sep. 2023, Dec; 50 (4): 595-705, doi: 10.1016/j.ogc.2023.08.003. Epub 2023 Sep 15. PMID: 37914488.
- [27] Q. Liu, Y. Xie, L. Qu, M. Zhang, y Z. Mo, «Dyslipidemia involvement in the development of polycystic ovary syndrome», *Taiwan. J. Obstet. Gynecol.*, vol. 58, n.º 4, pp. 447-453, jul. 2019, doi: 10.1016/j.tjog.2019.05.003.
- [28] A. Sokalska, S. D. Stanley, J. A. Villanueva, I. Ortega, y A. J. Duleba, «Comparison of effects of different statins on growth and steroidogenesis of rat ovarian theca-interstitial cells», *Biol Reprod*, vol. 90, n.º 2, p. 44, feb. 2014, doi: 10.1095/biolreprod.113.114843.
- [29] N. Ferri y A. Corsini, «Clinical evidence of statin therapy in non-dyslipidemic disorders», *Pharmacol. Res.*, vol. 88, pp. 20-30, oct. 2014, doi: 10.1016/j.phrs.2014.02.003.
- [30] S. Dinicola, T. T. Y. Chiu, V. Unfer, G. Carlomagno, y M. Bizzarri, «The rationale of the myo-inositol and D-chiro-inositol combined treatment for polycystic ovary syndrome», *J. Clin. Pharmacol.*, vol. 54, n.º 10, pp. 1079-1092, 2014, doi: 10.1002/jcph.362.
- [31] L. Pal, S. Jindal, B. R. Witt, y N. Santoro, «Less is more: increased gonadotropin use for ovarian stimulation adversely influences clinical pregnancy and live birth after in vitro fertilization», *Fertil. Steril.*, vol. 89, n.º 6, pp. 1694-1701, jun. 2008, doi: 10.1016/j.fertnstert.2007.05.055.
- [32] P. G. Artini *et al.*, «Endocrine and clinical effects of myo-inositol administration in polycystic ovary syndrome. A randomized study», *Gynecol. Endocrinol.*, vol. 29, n.º 4, pp. 375-379, abr. 2013, doi: 10.3109/09513590.2012.743020.
- [33] Z. Kamenov, G. Kolarov, A. Gateva, G. Carlomagno, y A. D. Genazzani, «Ovulation induction with myo-inositol alone and in combination with clomiphene citrate in polycystic ovarian syndrome patients with insulin resistance», *Gynecol. Endocrinol.*, vol. 31, n.º 2, pp. 131-135, feb. 2015, doi: 10.3109/09513590.2014.964640.



- [34] V. Unfer, F. Facchinetti, B. Orrù, B. Giordani, y J. Nestler, «Myo-inositol effects in women with PCOS: a meta-analysis of randomized controlled trials», *Endocr. Connect.*, vol. 6, n.º 8, pp. 647-658, sep. 2017, doi: 10.1530/EC-17-0243.
- [35] J. J. DiNicolantonio y J. H. O'Keefe, «Myo-inositol for insulin resistance, metabolic syndrome, polycystic ovary syndrome and gestational diabetes», *Open Heart*, vol. 9, n.º 1, p. e001989, mar. 2022, doi: 10.1136/openhrt-2022-001989.
- [36] H. Zhao, C. Xing, J. Zhang, y B. He, «Comparative efficacy of oral insulin sensitizers metformin, thiazolidinediones, inositol, and berberine in improving endocrine and metabolic profiles in women with PCOS: a network meta-analysis», *Reprod. Health*, vol. 18, n.º 1, p. 171, ago. 2021, doi: 10.1186/s12978-021-01207-7.
- [37] A. S. Laganà, A. Vitagliano, M. Noventa, G. Ambrosini, y R. D'Anna, «Myo-inositol supplementation reduces the amount of gonadotropins and length of ovarian stimulation in women undergoing IVF: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials», *Arch. Gynecol. Obstet.*, vol. 298, n.º 4, pp. 675-684, oct. 2018, doi: 10.1007/s00404-018-4861-y.
- [38] L. Pkhaladze, V. Unfer, y D. Dewailly, «Chapter 10 - Use of myo-inositol in the treatment of PCOS symptoms in adolescents», en *A Clinical Guide to Inositols*, V. Unfer y D. Dewailly, Eds., Academic Press, 2023, pp. 151-165. doi: 10.1016/B978-0-323-91673-8.00001-7.
- [39] V. Unfer, G. Monastra, M. Tilotta, G. Forte, y S. Dinicola, «Chapter 11 - Inositols and other supplements in the management of PCOS», en *Polycystic Ovary Syndrome*, E. Diamanti-Kandarakis, Ed., Elsevier, 2022, pp. 167-186. doi: 10.1016/B978-0-12-823045-9.00014-6.
- [40] D. Greff *et al.*, «Inositol is an effective and safe treatment in polycystic ovary syndrome: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials», *Reprod. Biol. Endocrinol.*, vol. 21, n.º 1, p. 10, ene. 2023, doi: 10.1186/s12958-023-01055-z.
- [41] L. Barrea, L. Verde, C. Vetrani, S. Savastano, A. Colao, y G. Muscogiuri, «Chronotype: A Tool to Screen Eating Habits in Polycystic Ovary Syndrome?», *Nutrients*, vol. 14, n.º 5, Art. n.º 5, ene. 2022, doi: 10.3390/nu14050955.
- [42] R. Bodepudi *et al.*, «Myoinositol Versus Metformin in the Treatment of Polycystic Ovarian Syndrome: A Systematic Review», *Cureus*, vol. 15, n.º 7, p. e41748, jul. 2023, doi: 10.7759/cureus.41748.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Contenido de metales pesados en sedimentos de varios ríos de Costa Rica

Heavy metals content in sediments of several rivers in Costa Rica

Guillermo Calvo-Brenes¹, Noemi Quirós-Bustos², Diana
Robles-Chaves³, Andrey Caballero-Chavarría⁴


Fecha de recepción: 13 de noviembre, 2023


Fecha de aprobación: 9 de marzo, 2024

Calvo-Brenes, G; Quirós-Bustos, N; Robles-Chaves, D;
Caballero-Chavarría, A. Contenido de metales pesados en
sedimentos de varios ríos de Costa Rica. *Tecnología en Mar-
cha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 141-151.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6940>

1 Centro de Investigación en Protección Ambiental, Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 calvogmo@yahoo.com


 <https://orcid.org/0000-0002-7021-3509>

2 Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos, Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 nquiros@itcr.ac.cr


 <https://orcid.org/0000-0002-2064-4300>

3 Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos, Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 drobles@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-8173-9610>

4 Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos, Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 acaballero@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-5584-8821>



Palabras clave

Metales pesados; calidad de ríos; contaminación.

Resumen

Costa Rica posee una abundancia de recursos hídricos, sin embargo, enfrenta un alto nivel de contaminación. Los metales pesados (MPs) destacan debido a sus efectos perjudiciales en la salud de personas, animales y plantas, así como por su falta de biodegradabilidad y su propensión a acumularse en los organismos. Esta contaminación proviene tanto de descargas directas de aguas residuales domésticas e industriales en los ríos, como de la contaminación difusa originada en actividades agrícolas y la contaminación atmosférica. Un estudio reciente realizado en los ríos de Costa Rica reveló la presencia de MPs, tales como plomo, cromo, cobre, arsénico, níquel y mercurio. El objetivo de esta investigación fue evaluar la concentración de estos metales en los sedimentos de los ríos. Se muestrearon 26 sitios distribuidos en diversas zonas del país, abarcando el período comprendido entre 2017 y 2019. Los niveles de toxicidad para el cadmio fueron clasificados como no probable, al igual que la mayoría de los lugares muestreados para arsénico, plomo, cromo y mercurio. En cuanto al cobre y níquel, se observaron niveles que oscilaron entre toxicidad no probable e indefinida. Sin embargo, algunos datos relacionados con níquel, cobre y cromo se ubicaron en la zona de toxicidad probable.

Keywords

Heavy metals; river quality; contamination.

Abstract

Costa Rica has an abundance of water resources, however, it faces a high level of pollution. Heavy metals (PMs) stand out due to their harmful effects on the health of people, animals and plants, as well as their lack of biodegradability and their propensity to accumulate in organisms. This pollution comes from both direct discharges of domestic and industrial wastewater into rivers, as well as diffuse pollution originating from agricultural activities and atmospheric pollution. A recent study carried out in the rivers of Costa Rica revealed the presence of MPs, such as lead, chromium, copper, arsenic, nickel and mercury. The objective of this research was to evaluate the concentration of these metals in river sediments through 26 sampling sites distributed in various areas of the country, covering the period between 2017 and 2019. The toxicity levels for cadmium were classified as not probable, as were the majority of the places sampled for arsenic, lead, chromium and mercury. Regarding copper and nickel, levels ranged from unlikely to undefined toxicity were observed. However, some data related to nickel, copper and chromium were in the zone of probable toxicity.

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 [2], [3]. Diferentes contaminantes que se mantienen suspendidos en el aire en forma de partículas [4], [5], 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 [6]–[8].

Un tipo importante de contaminantes son los metales pesados (MPs) 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 [8], [9]. Estos metales se encuentran en la naturaleza y forman parte de los procesos metabólicos en la flora y fauna [10], [11]. Sin embargo, cuando estos sobrepasan ciertos niveles, se convierten en contaminantes de alta peligrosidad [6], [9]. Los MPs 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 [2], [12].

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 [9], [11].

El hecho de que los MPs sean bioacumulables y que su biodegradabilidad sea prácticamente nula, ocasionan efectos tóxicos duraderos [9], [11]. 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 [11].

La contaminación por MPs en el ambiente se da por 5 posibles vías: retención en suelos, absorción en plantas (cadena trófica) [2], en material particulado en aire (PM_{10} y $PM_{2.5}$) donde usualmente se encuentra retenido y el cual, a su vez, está en suspensión [7]; retención en polvos urbanos, así como la movilización en aguas superficiales y subterráneas [2].

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 [9]. 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 [13]. Su efecto dañino en el caso del ser humano proviene por la ingesta de agua contaminada con MPs, pero también en flora y fauna contaminada con metales y que sean parte de la cadena alimentaria del hombre [14].

Un estudio reciente en 26 sitios de muestreo en los ríos Arenal, Caño Negro, Temquisque, Pital, Toro, Tigre, Rincón, Sierpe, Torres, Poás, Segundo, Pacuare, Panshurt y Birris, que se ubican en las regiones de San Carlos, Guanacaste, el Atlántico, el Gran Área Metropolitana y Osa, mostraron la presencia de cobre, cromo, níquel y mercurio. También se detectó plomo y arsénico aunque solamente en algunos de los sitios muestreados. En el caso del arsénico y el mercurio, su contenido se encontró en niveles de toxicidad probable [15].

Materiales y métodos

Selección de los puntos de muestreo

Se seleccionaron 26 puntos de muestreo ubicados en diferentes regiones del país: San Carlos, Guanacaste, el Atlántico, el Gran Área Metropolitana y Osa. Los sitios de muestreo se ubicaron en los ríos Arenal, Caño Negro, Tempisque, Pital, Toro, Tigre, Rincón, Sierpe, Torres, Poás, Segundo, Pacuare, Panshurt y Birris.

Los sitios específicos (figura 2) se muestrearon por un espacio de 2 años en forma bimensual y los metales pesados (MPs) analizados fueron: plomo (Pb), cobre (Cu), cadmio (Cd), arsenico (As), cromo (Cr), níquel (Ni), y mercurio (Hg).



Figura 1. Sitios de muestreo en cada una de las cuencas, subcuencas o microcuencas del país.

Recolección de muestras de sedimentos

Las muestras de sedimentos se recolectaron durante las giras de recolección de las muestras de agua, durante el mismo período y frecuencia. El muestreo se realizó por duplicado de manera compuesta recolectando dos bolsas de sedimento superficial en las orillas del cauce, utilizando una espátula plástica y se guardaron en bolsas plásticas de polietileno herméticamente cerradas, se transportaron y almacenaron a temperatura ambiente.

Análisis de metales pesados en sedimentos

Las muestras se secaron en una incubadora Thermo Scientific a 45°C por 48 horas. Posteriormente se pulverizaron para su homogenización [16] y luego se realizó un tamizado de < 2 mm de diámetro [17] y se almacenaron para su posterior proceso de digestión.

La digestión se realizó utilizando el método SW-846 3051A de la U.S. EPA [18] y cada muestra de sedimento consistió en 0.5 g, aproximadamente. Se añadieron 9 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 1 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrados [17], a los tubos de digestión del horno microondas marca CEM modelo Mars 6. Este horno trabaja con una potencia de 1800 W a una temperatura de 175 °C durante un intervalo de 5 min. Una vez terminada la digestión las muestras fueron trasvasadas y aforadas con una disolución ácida de HNO_3 al 2% en balones de 50 mL utilizando un papel filtro para análisis cuantitativo marca Fisherbrand para su posterior medición.

Las disoluciones ácidas resultantes de las digestiones fueron analizadas por medio de espectrometría de absorción atómica, utilizando el espectrómetro de absorción atómica marca Perkin-Elmer modelo AAnalyst-800.

El Hg fue medido mediante la técnica de generación de hidruros y los metales restantes (As, Cd, Cr, Cu, Ni y Pb) fueron analizados por medio de horno de grafito para la determinación de concentraciones a nivel de trazas, lo anterior siguiendo las metodologías establecidas en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” [19].

Validación 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.

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.

Calidad de los sedimentos

Nuestro país cuenta con un reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de aguas superficiales, que clasifica la calidad de los ríos en 5 clases y para cada una de ellas también se indican los diferentes posibles usos. En el caso de las aguas, se cuenta con información para los metales pesados, pero para los sedimentos no existe información.

Lineamientos de calidad de sedimentos (SQG)

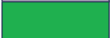


Existen varios lineamientos a nivel mundial reportados para valorar el contenido de MPs en sedimentos. Los SQG fueron desarrollados en Estados Unidos utilizando diferentes enfoques con el fin de proteger los ecosistemas bentónicos, la pesca y la calidad del agua superficial; además, su confiabilidad ha sido validada por medio de paneles con la participación de expertos, con el objetivo de llegar a consensos, tomando en consideración aspectos químicos en los sedimentos y datos de toxicidad en campo en estudios llevados a cabo a lo largo de los Estados Unidos [20]. A cada contaminante se le determinaron sus respectivas concentraciones de efecto umbral (TEC) y concentraciones de efecto probable (PEC). Valores por debajo del TEC corresponden a aquellos casos en los que no se espera alguna toxicidad, por encima del valor PEC está asociado a una probable toxicidad, y entre ambos valores no se puede predecir si son tóxicos o no tóxicos por lo que se requieren mayores estudios particulares.

En esta investigación se decidió clasificar aquellos valores de contenido de MPs inferiores al TEC como “Toxicidad no probable” y se representó con el color verde; valores superiores al PEC se clasificó como “Toxicidad probable” y se asoció con el color rojo. En el caso de que los valores que se encuentren entre ambos valores, se clasificó como “Toxicidad indefinida” y se identificará con el color amarillo. Estas directrices para sedimentos evalúan el grado en que el contaminante podría afectar negativamente a organismos acuáticos y están diseñadas para ayudar en la interpretación de la calidad de los sedimentos (cuadro 1).

Cuadro 1. Niveles de permisibilidad de MPs para agua y sedimentos.

MP	Agua (Clase I, mg/L)	Sedimentos	
		TEC (mg/Kg DW)	PEC (mg/Kg DW)
Pb	<0.03	35.8	128
Cr	<0.05	43.4	111
Cd	<0.005	0.99	4.98
Hg	<0.001	0.15	1.00
Cu	<0.5	31.6	149
As	<0.01	9.79	33.6
Ni	<0.05	22.7	48.6

Nota: El Hg se tomó de la normativa Australiana [21].
Por debajo del TEC es verde (toxicidad no probable), entre TEC y PEC es amarillo (toxicidad indefinida), sobre PEC es rojo (toxicidad probable).

Color	Clasificación
	Toxicidad no probable
	Toxicidad indefinida
	Toxicidad probable

Resultados y discusión

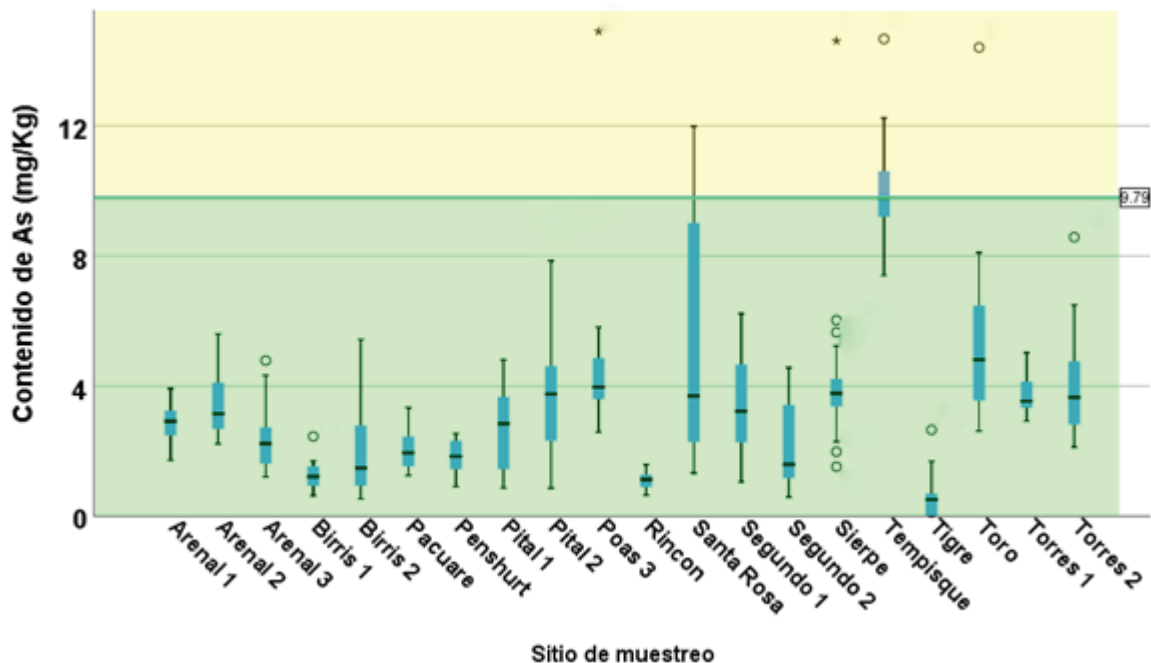


Figura 2. Contenido de As en sedimentos en los sitios muestreados.

La presencia de As en sedimentos se presentó en todos los puntos de muestreo (figura 2). En la mayoría de los casos se encuentre en el rango de “toxicidad no probable”.

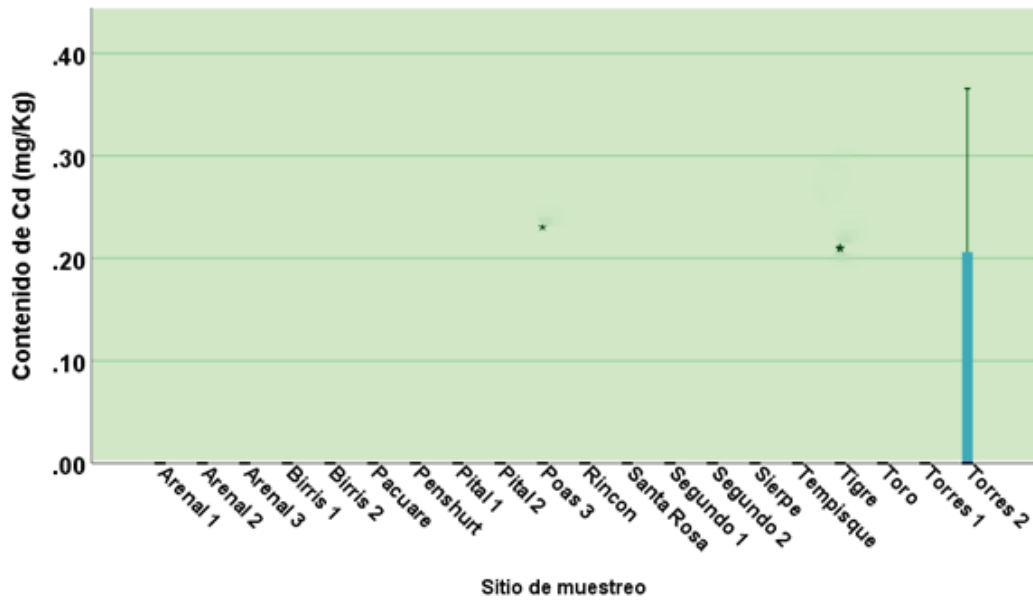


Figura 3. Contenido de Cd en sedimentos en los sitios muestreados.

En general, el contenido de Cd no se encontró en ninguno de los puntos de muestreo en agua; sin embargo, está presente consistentemente durante los muestreos efectuados en el sitio Torres 2. También se detectó su presencia en una ocasión en el sitio Poás 3 y en Tigre. Aún así, estos casos corresponden a el tipo de “toxicidad no probable” (figura 3).

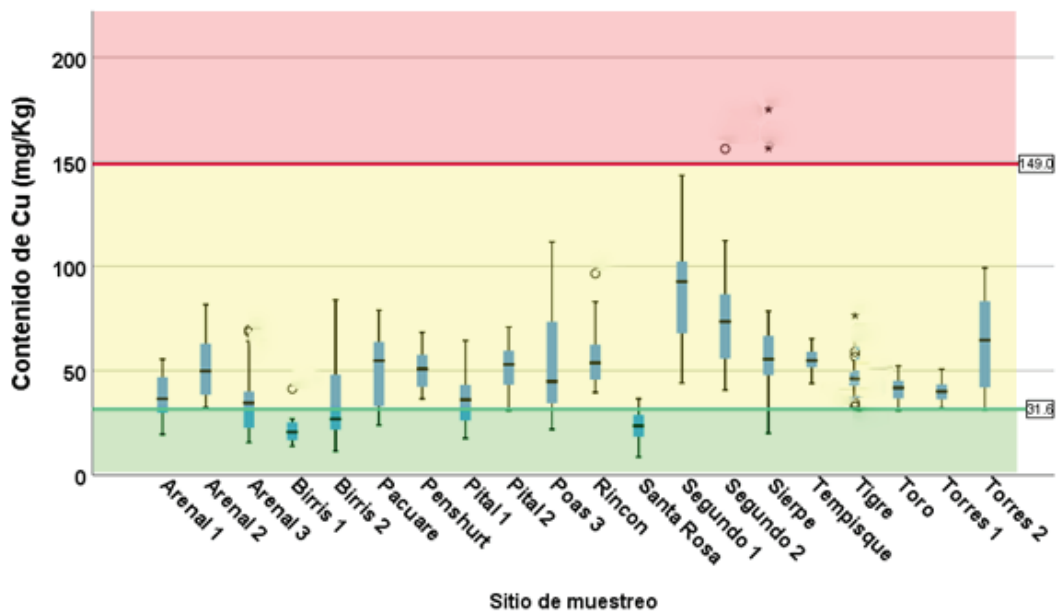


Figura 4. Contenido de Cu en sedimentos en los sitios muestreados.

La presencia de Cu estuvo presente en todos los sitios de muestreo, tal como se observa en la figura 4. En general, los contenidos corresponden a una “toxicidad indefinida”, excepto en algunos casos.

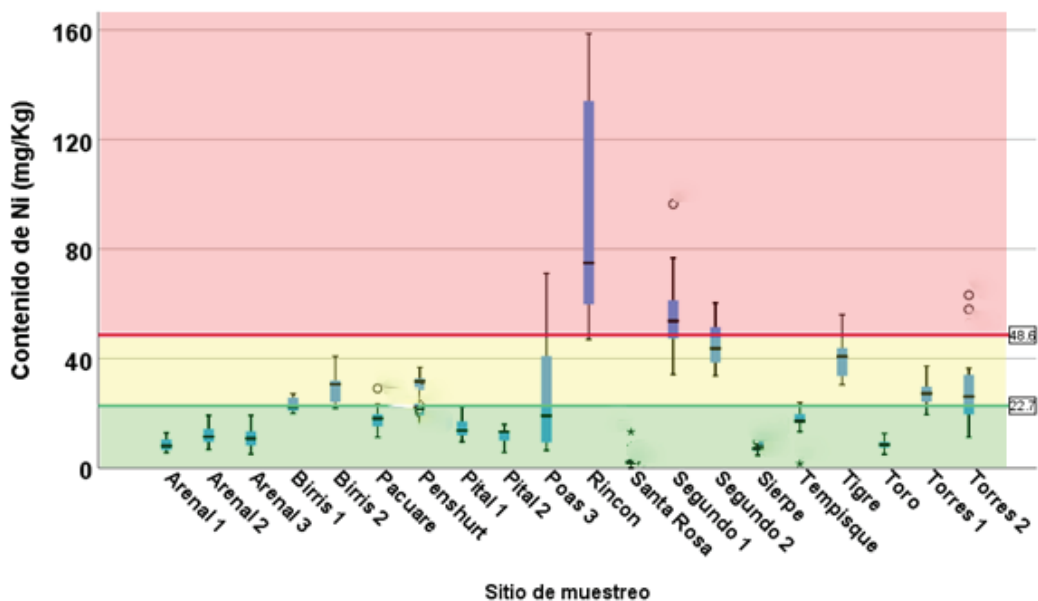


Figura 5. Contenido de Ni en sedimentos en los sitios muestreados.

La presencia de Ni se detectó en todos los puntos de muestreo. El contenido de Ni osciló entre el rango de “toxicidad no probable” y “toxicidad indefinida”, excepto en el caso de los sitios Rincón, Segundo 1, parte de los muestreos en Segundo 2 y algunos muestreos en el Torres 2, Tigre y Poas 3, cuyos valores corresponden a “toxicidad probable” (figura 5).

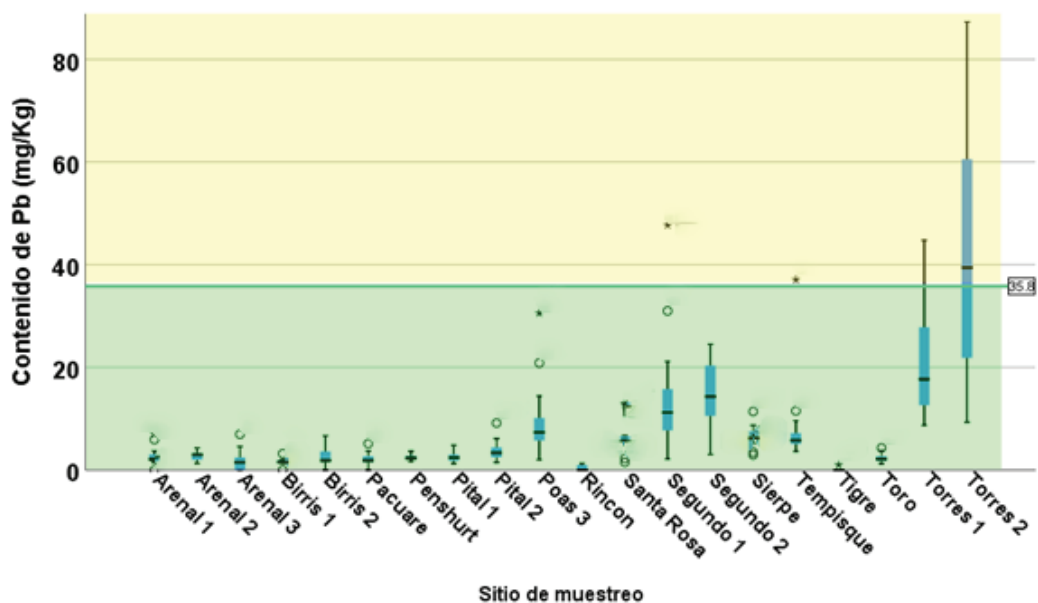


Figura 6. Contenido de Pb en sedimentos en los sitios muestreados.

El Pb estuvo presente en todos los sitios de muestreo, los datos se ubican en el rango de “toxicidad no probable”, excepto en algunos muestreos en el sitio Segundo 1, Tempisque, Torres 1 y 2, lo cuales corresponden al rango de “toxicidad indefinida” (figura 6).

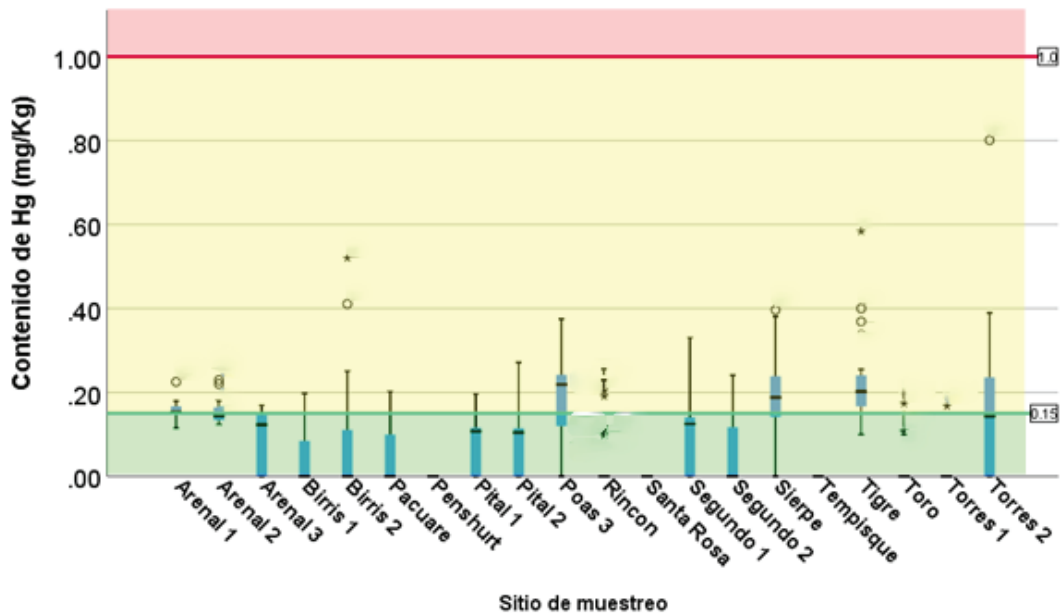


Figura 7. Contenido de Hg en sedimentos en los sitios muestreados.

La presencia de Hg se detectó en todos los sitios de muestreo, excepto Penshurt, Santa Rosa y Tempisque. En su mayoría se ubican en el rango de “toxicidad no probable” y en algunos puntos y fechas del muestreo, el rango correspondió a “toxicidad indefinida” (figura 7).

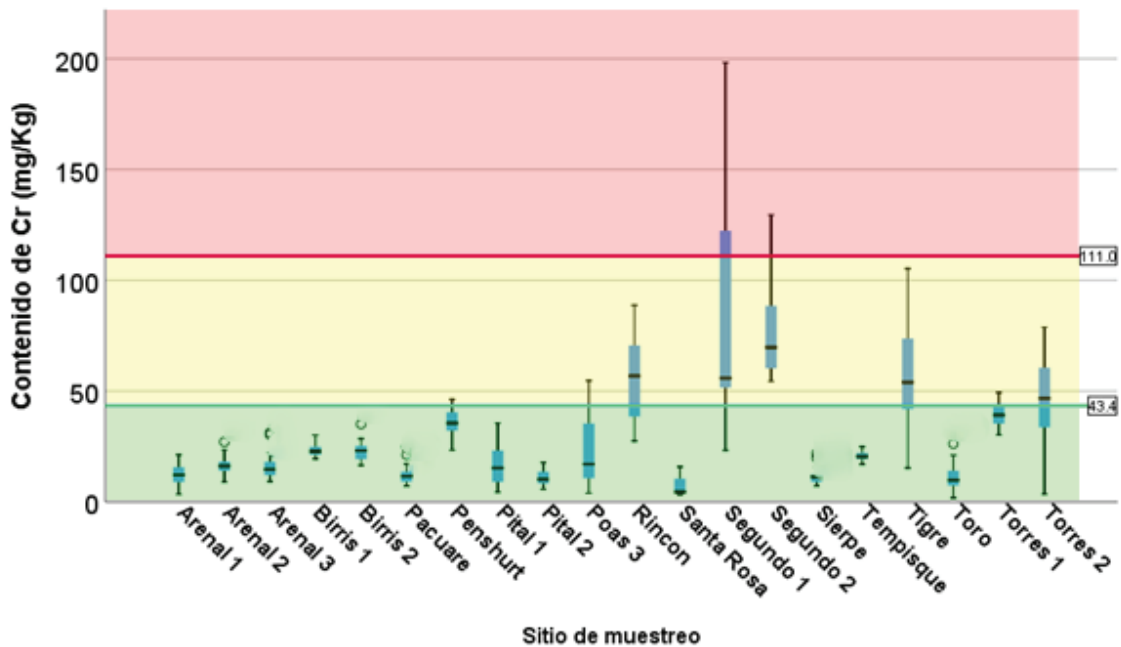


Figura 8. Contenido de Cr en sedimentos en los sitios muestreados.

El Cr se detectó en todos los sitios de muestreos y en la mayoría de los casos, se encuentran en el rango de “toxicidad no probable”, excepto el sitio Segundo 2, que se ubica en el rango de “toxicidad indefinida” y “toxicidad probable”. Además, los sitios Poas 3, Tigre, Torres 1 y 2 oscilan sus contenidos entre “toxicidad no probable” y “toxicidad indefinida”. El caso del sitio Segundo 1 muestra una oscilación en su contenido en los 3 rangos de toxicidad (figura 8).

Conclusiones

Todos los MPs, excepto el Cd, se encontraron en casi todos los ríos en concentraciones que, en algunos casos, se encuentran en el rango de “Toxicidad Probable”. Tal es el caso del As y el Ni en la cuenca del Tempisque y el Hg en la mayoría de los sitios muestreados.

En el caso de los sedimentos, el contenido de MPs es más frecuente y aparece en sitios que en el caso de su contenido en ríos, no aparecía. En la mayoría de los casos, el contenido está en el nivel de “Toxicidad No Probable” y en algunos, en el rango de “Toxicidad Indefinida”.

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.

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*, First. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2018.
- [2] H. Ali, E. Khan, and I. Ilahi, “Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation,” *Journal of Chemistry*, vol. 2019, pp. 1–14, Mar. 2019, doi: 10.1155/2019/6730305.
- [3] A. Mora, M. García-Gamboa, M. S. Sánchez-Luna, L. Gloria-García, P. Cervantes-Avilés, and J. Mahlkecht, “A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla,” *Science of The Total Environment*, vol. 782, p. 146788, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146788.
- [4] L. T. Popoola, S. A. Adebajo, and B. K. Adeoye, “Assessment of atmospheric particulate matter and heavy metals: a critical review,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 935–948, May 2018, doi: 10.1007/s13762-017-1454-4.
- [5] T. Salazar-Rojas, F. R. Cejudo-Ruiz, and G. Calvo-Brenes, “Assessing magnetic properties of biomonitors and road dust as a screening method for air pollution monitoring,” *Chemosphere*, vol. 310, p. 136795, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136795.
- [6] G. Calvo-Brenes, *Ríos: Fundamentos sobre su calidad y su relación con el entorno socioambiental*, First. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2015.
- [7] X. Leng *et al.*, “Prediction of size-fractionated airborne particle-bound metals using MLR, BP-ANN and SVM analyses,” *Chemosphere*, vol. 180, pp. 513–522, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.04.015.
- [8] H. Li, J. Wang, Q. Wang, C. Tian, X. Qian, and X. Leng, “Magnetic Properties as a Proxy for Predicting Fine-Particle-Bound Heavy Metals in a Support Vector Machine Approach,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 12, pp. 6927–6935, Jun. 2017, doi: 10.1021/acs.est.7b00729.

- [9] Y. Hong *et al.*, "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, pp. 1–12, May 2020, doi: 10.1155/2020/9010348.
- [10] T. Salazar-Rojas, F. R. Cejudo-Ruiz, and G. Calvo-Brenes, "Comparison between machine linear regression (MLR) and support vector machine (SVM) as model generators for heavy metal assessment captured in biomonitors and road dust," *Environmental Pollution*, vol. 314, p. 120227, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120227.
- [11] S. Stankovic, P. Kalaba, and A. R. Stankovic, "Biota as toxic metal indicators," *Environ Chem Lett*, vol. 12, no. 1, pp. 63–84, Mar. 2014, doi: 10.1007/s10311-013-0430-6.
- [12] U. C. Nkwunonwo, P. O. Odika, and N. I. Onyia, "A Review of the Health Implications of Heavy Metals in Food Chain in Nigeria," *The Scientific World Journal*, vol. 2020, pp. 1–11, Apr. 2020, doi: 10.1155/2020/6594109.
- [13] WHO, "What are the WHO Air quality guidelines?: Improving health by reducing air pollution." 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>
- [14] I. W. Delince, "Riesgo agroambiental por metales pesados en suelos con Cultivares de *Oryza sativa* L y *Solanum tuberosum* L Heavy metals agroenvironmental risk in soils with cultivate *Oryza sativa* L. and *Solanum tuberosum* L," vol. 24, no. 1, p. 7, 2015.
- [15] N. Quirós-Bustos, D. Robles-Chaves, A. Caballero-Chavarría, and G. Calvo-Brenes, "Contenido de metales pesados en varios ríos de Costa Rica," *TM*, Mar. 2022, doi: 10.18845/tm.v35i2.5532.
- [16] C. Montalvo *et al.*, "Metal Contents in Sediments (Cd, Cu, Mg, Fe, Mn) as Indicators of Pollution of Palizada River, Mexico," *Environment and Pollution*, vol. 3, no. 4, pp. 89–98, 2014, doi: 10.5539/ep.v3n4p89.
- [17] N. P. Castro-González, F. Calderón-Sánchez, R. Moreno-Rojas, J. V. Tamariz-Flores, and E. Reyes-Cervantes, "Heavy metals pollution level in wastewater and soils in the alto balsas sub-basin in tlaxcala and puebla, Mexico," *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 35, no. 2, pp. 335–348, 2019, doi: 10.20937/RICA.2019.35.02.06.
- [18] EPA, "U.S. EPA Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils." 2007.
- [19] APHA, AWWA and AEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. WA, DC, USA, 2017.
- [20] D. D. MacDonald, C. G. Ingersoll, and T. A. Berger, "Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems," *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 39, no. 1, pp. 20–31, Jun. 2000, doi: 10.1007/s002440010075.
- [21] DEC, "Assessment levels for soil, sediment and water." 2010. [Online]. Available: https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/2009641_-_assessment_levels_for_soil_sediment_and_water_-_web.pdf

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Alergia al Ácido Acetilsalicílico (AAS) en el contexto de AINEs: navegando desde una perspectiva inmunitaria

Acetylsalicylic Acid (ASA) allergy in the context of NSAIDs: navigating from an immune perspective

Reychell Barrantes-Alvarado¹, Julyana Coronado-Salazar², Donalld
Díaz-Méndez³, Andrés Monge-Brenes⁴, Alison Salas-Campos⁵

Fecha de recepción: 14 de noviembre, 2023


Fecha de aprobación: 26 de marzo, 2024

Barrantes Alvarado, R; Coronado Salazar, J; Díaz Méndez, D; Monge Brenes, A; Salas Campos, A. Alergia al Ácido Acetilsalicílico (AAS) en el contexto de AINEs: navegando desde una perspectiva inmunitaria. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 152-161.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6943>


1 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 reybarrantes@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0009-3542-0594>


2 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 jucoronado@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0005-4565-7721>

3 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 dondiaz@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0006-1226-4355>

4 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 andres.mb@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0007-0738-5125>

5 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 alisonsalas@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0001-5596-4486>



Palabras clave

Intolerancia a la aspirina; inflamatorio; ciclooxigenasa (COX); tromboxanos; prostaglandinas; prostaciclina; antinocicepción.

Resumen

Los antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) se utilizan en todo el mundo para tratar el dolor y la inflamación; sin embargo, pueden desencadenar varios tipos de reacciones de hipersensibilidad a fármacos en todos los grupos de edad. Un número significativo de reacciones de hipersensibilidad a los AINEs se deben a mecanismos inmunológicos. Con el fin de proporcionar una base que permita una mejor comprensión y gestión médica a la alergia al ácido acetilsalicílico (AAS) en el contexto de antiinflamatorio no esteroide (AINEs), este artículo tiene el propósito de revisar los principales aspectos relativos a las causas, mecanismo inmunológico, síntomas, diagnóstico y opciones de tratamiento relacionados con esta alergia. Los AINEs se clasifican según su estructura química y su selectividad para inhibir las enzimas COX. Se resaltan las ventajas de los AINEs selectivos de COX-2 al minimizar los efectos secundarios gastrointestinales, y se destaca el AAS como un fármaco comúnmente recetado debido a su actividad multifuncional, incluida la prevención del accidente cerebrovascular y el infarto de miocardio.

Keywords

Aspirin intolerance; inflammatory; cyclooxygenase (COX); thromboxanes; prostaglandins; prostacyclin; antinociception.

Abstract

Nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) are used worldwide to treat pain and inflammation; however, they can trigger various types of drug hypersensitivity reactions in all age groups. A significant number of hypersensitivity reactions to NSAIDs are due to immunological mechanisms. In order to provide a basis for better understanding and medical management of acetylsalicylic acid (ASA) allergy in the context of nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs), this article aims to review the main aspects regarding the causes, immunologic mechanism, symptoms, diagnosis, and treatment options related to this allergy. NSAIDs are classified according to their chemical structure and their selectivity to inhibit COX enzymes. The advantages of COX-2 selective NSAIDs in minimizing gastrointestinal side effects are highlighted, and ASA is highlighted as a commonly prescribed drug because of its multifunctional activity, including prevention of stroke and myocardial infarction.

Introducción

Los antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) son un grupo de medicamentos ampliamente utilizados que tienen propiedades antiinflamatorias, analgésicas y antipirética, los cuales son los principales desencadenantes de reacciones de hipersensibilidad a medicamentos [1-2]. Con el fin de proporcionar una base que permita una mejor comprensión y gestión médica de la alergia al ácido acetilsalicílico (AAS) en el contexto de antiinflamatorio no esteroide (AINEs), este artículo busca revisar los principales aspectos relativos a las causas, mecanismo inmunológico, síntomas, diagnóstico y opciones de tratamiento relacionadas con esta alergia.

Mecanismo de acción

El principal mecanismo de acción de los AINEs es la inhibición de la enzima ciclooxigenasa (COX). La ciclooxigenasa participa en el metabolismo del ácido araquidónico para la síntesis de tromboxanos, prostaglandinas y prostaciclina. Los efectos terapéuticos de los AINEs se atribuyen a la ausencia de estos eicosanoides. Principalmente, los tromboxanos desempeñan un papel en la adhesión plaquetaria, las prostaglandinas provocan vasodilatación, aumentan el punto de ajuste de temperatura en el hipotálamo y desempeñan un papel en la antinocicepción [1-2].

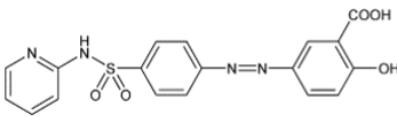
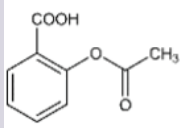
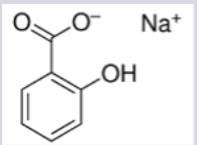
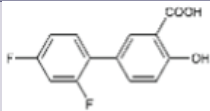
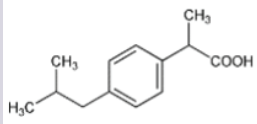
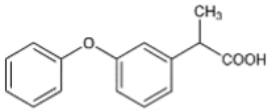
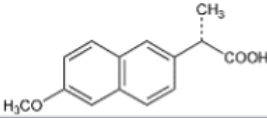
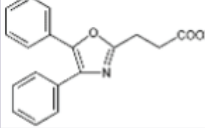
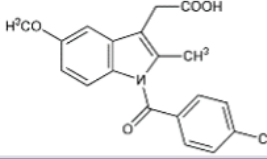
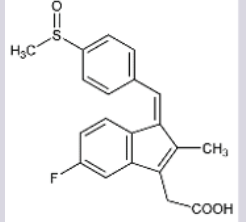
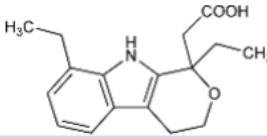
Existen dos isoformas principales de ciclooxigenasa, COX-1 y COX-2. La COX-1 se expresa constitutivamente y desempeña un papel en el mantenimiento del revestimiento de la mucosa gastrointestinal, la función renal y la agregación plaquetaria. La COX-2 no se expresa constitutivamente y en cambio, se expresa de manera inducible durante una respuesta inflamatoria. La mayoría de los AINEs no son selectivos e inhiben tanto la COX-1 como la COX-2, por lo tanto, los AINEs selectivos para la COX-2 tienen un perfil de efectos secundarios diferente. Es importante destacar que, debido a que la COX-1 es el principal mediador para garantizar la integridad de la mucosa gástrica y la COX-2 participa principalmente en la inflamación, los AINEs selectivos de la COX-2 deberían proporcionar un alivio antiinflamatorio sin comprometer la mucosa gástrica [1-2].

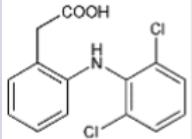
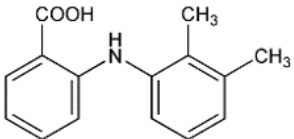
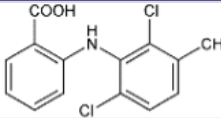
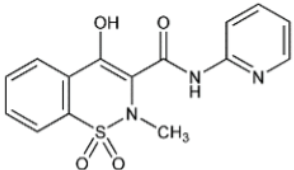
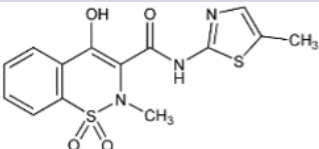
Clasificación de los AINEs

Los AINEs ácidos comprenden un grupo de sustancias estructuralmente diversas que albergan un grupo carboxilo en su estructura los cuales se clasifican como salicilatos, pertenecientes a la clase de ácido fenilacético, ácido antranílico, ácido acético indol, ácido indeno y ácido propiónico [3]. En el cuadro 1 se encuentran especificadas estas divisiones, junto con sus medicamentos correspondientes y la estructura química asociada, ofreciendo una perspectiva sistemática que caracteriza las distintas familias de agentes terapéuticos.

Primeramente, se puede mencionar que la clase proveniente del ácido salicílico pertenece a una gran categoría de fenólicos vegetales con un anillo aromático que incluye conjuntos hidroxilo o sus derivados funcionales, además, la parte procedente del ácido arilo o heteroarilo acético posee una estructura esquelética de $\text{Ar-CH}(\text{CH}_3)\text{-COOH}$ [4]. Por otro lado, para la tercera clasificación, las fórmulas químicas incluyen un ciclo de carbono sustituido en la posición α de $\text{-CH}_2\text{-COOH}$. Seguidamente, los antranilatos se caracteriza por la presencia de pequeños sustituyentes alquilo y/o halógenos en la posición 2', 3' y/o 6' de la fracción N-arilo. Por último, los derivados del ácido enólico, principalmente el meloxicam y la piroxicam, se caracterizan por poseer un heterociclo de 4-hidroxibenzotiazina [5].

Cuadro 1. Clasificación de los fármacos antiinflamatorios no esteroideos de acuerdo con su estructura química.

Grupo químico	Fármaco	Estructura química
Derivados del ácido salicílico	Sulfasalazina	
	Ácido acetilsalicílico	
	Salicilato de sodio	
	Diflunisal	
Derivados del ácido arilo o heteroarilo acético	Ibuprofeno	
	Fenoprofeno	
	Naproxeno	
	Oxaprozin	
Derivados del indol e Indeno acético ácidos	Indometacina	
	Sulindaco	
	Etodolaco	

Grupo químico	Fármaco	Estructura química
Derivados del ácido antranílico	Diclofenaco	
	Ácido mefenámico	
	Ácido meclofenámico	
Derivados del ácido enólico	Piroxicam	
	Meloxicam	

Nota: Se muestra la clasificación de los AINEs de acuerdo su estructura química dividida en cinco grupos que incluyen sus derivados [4].

Clasificación alternativa de los AINEs.

Dado que la función de los AINEs se manifiesta principalmente en el sistema enzimático ciclooxigenasa, ya sea la COX-1 o la COX-2, su clasificación depende de la selectividad con respecto a los dos tipos de enzimas mencionados anteriormente.

Existen inhibidores de COX no selectivos que bloquean tanto la COX-1 como la COX-2, reduciendo la inflamación, la fiebre y el dolor. Por otro lado, los inhibidores preferenciales de la COX-2 se enfocan principalmente en bloquear esta enzima en lugar de la COX-1, lo que disminuye la síntesis de prostaglandinas aminorando los efectos desfavorables producidos en el cuerpo, pero con menos efectos analgésicos. Por último, la inhibición selectiva de la COX-2 se desarrolló para reducir la toxicidad gastrointestinal y sigue siendo efectiva en el tratamiento de la inflamación [6]. Por ello, cabe recalcar que la elección adecuada de dichos inhibidores en función de las necesidades clínicas y terapéuticas de los pacientes es esencial para lograr resultados óptimos en el manejo de los malestares mencionados en un inicio. Asimismo, se pueden clasificar según su farmacodinamia, como los de acción corta (vida media plasmática inferior a 6 h) y de acción prolongada (vida media más de 10 h) [3].

Ventajas y desventajas de diferentes tipos de AINEs.

Se han identificado riesgos de infarto de miocardio y accidentes cerebrovasculares en los AINEs selectivos y no selectivos de la COX-2 (que se encuentra en la inflamación) y la COX-1 (la cual se localiza en el estómago, las plaquetas y los vasos sanguíneos) [7]. El uso crónico de la mayoría de los AINEs es desalentado debido a la amplia variedad de efectos adversos que incluyen problemas gastrointestinales y renales. Estas reacciones adversas se vuelven más pronunciadas en individuos con afecciones preexistentes relacionadas con el sistema cardiovascular, cerebrovascular, gastrointestinal o renal. Se ha propuesto que la selectividad relativa de los diferentes agentes en la inhibición de los dos isómeros de la COX está relacionada con el riesgo de complicaciones gastrointestinales y cardiovasculares, aunque esta afirmación carece de respaldo con evidencia sólida [8].

Por el contrario, una de las ventajas de los AINEs es su actividad en el control de la inflamación y el dolor que se ha mostrado en diversas afecciones como la artritis reumatoide, la osteoporosis, dolor dental y dolores de cabeza. Estos agentes ejercen sus efectos antiinflamatorios, antipiréticos y analgésicos bloqueando la actividad de las enzimas COX, en diversos grados inhibiendo así la biosíntesis de prostaglandinas y prostanoides derivados del ácido araquidónico [8].

Catabolismo del ácido acetilsalicílico (AAS)

Gran parte de los AINEs se metabolizan a través de la oxidación y conjugación por medio de metabolitos inactivos, lo cual permite excretarlos a través de la orina. Este proceso ocurre en el hígado y los riñones, donde diversas enzimas descomponen estos medicamentos. Sin embargo, ciertas enzimas se destacan por contar con mayor afinidad hacia el metabolismo del ácido acetilsalicílico (AAS) [9].

Este tipo de fármacos presenta una buena biodisponibilidad en animales de una sola cavidad estomacal, sin embargo, su excreción en la orina es baja debido a su alta unión a proteínas plasmáticas. En este proceso, las enzimas microsomales del citocromo P450 con oxidasas de función mixta son fundamentales, ya que se encargan principalmente del metabolismo de estos medicamentos [9].

La N-acetiltransferasa 2 es una enzima esencial dentro del metabolismo y la desintoxicación de fármacos como la Aspirina. Actúa por medio de la O-acetilación de N-hidroxiarilaminas, los cuales son productos resultantes de la oxidación por enzimas pertenecientes al citocromo P450 [10].

La UDP-glucuronosiltransferasa (UGT) se encarga de facilitar la eliminación de compuestos formando enlaces covalentes entre el ácido glucurónico y fármacos o compuestos lipofílicos, tanto endógenos como exógenos. Esto aumenta la solubilidad del ácido acetilsalicílico en la orina y permite su eliminación del cuerpo de manera efectiva [11].

Intolerancia al ácido acetilsalicílico (AAS)

La alergia a un medicamento se fundamenta en una respuesta de hipersensibilidad y reacción corporal al entrar en contacto con el alérgeno, desencadenando respuestas inmunológicas que impactan tanto en la condición del paciente como en la eficacia del tratamiento [12]. En el caso del AAS, su acción antipirética al inhibir el proceso en el hipotálamo implica la participación de leucocitos polimorfonucleares en las áreas inflamadas. La inhibición de la ciclooxigenasa-1 (COX-1), responsable de la síntesis del tromboxano A₂ (TXA₂), precursores clave en la hemostasia y regulación de las hemorragias, interactúa con las células del estroma, generando así una inflamación crónica en la región afectada [13-14].

De igual forma, la principal causa de alergia ante la aspirina es debido a la inhibición de inmunoglobulinas (IgE), lo que activa COX-2 y genera respuestas inmunológicas contra este antialérgico [15-16]. Se reporta que de cada millón de personas que consumen AINEs fallecen cerca de 25 debido a efectos adversos ocasionados por la inhibición de COX, entre cuyas causas se podría encontrar la alergia a estos productos y más específicamente al AAS [13-14].

Existe una gran cantidad de inmunoglobulinas E (IgE) específicas que reconocen los diferentes tipos de AINEs presentes, mediando la respuesta alérgica [14]. Dado que los AINEs poseen un peso molecular muy bajo, para iniciar su efecto farmacológico requieren unirse o conjugarse a una proteína que lo reconozca, lo que implica la presencia anterior del AINE en el cuerpo para la generación de los antígenos [17-18].

Durante el proceso de conjugación, células dendríticas, clave en la respuesta inmunológica, procesan los linfocitos Th2 adultos, que promueven la producción de IgEs específicas para el AINE procesado por cuerpo [14]. Estos anticuerpos, se unen posteriormente a receptores muy específicos de basófilos y mastocitos, células del sistema circulatorio que liberan sustancias proinflamatorias y compuestos como histamina, que promueven la regulación por vasos y otras estructuras, para minimizar el movimiento del AINE por el torrente sanguíneo, reduciendo su distribución [19-20]. La alergia se genera entonces como una respuesta inmunitaria en la que están implicadas células (e.g. los mastocitos), anticuerpos y compuestos proinflamatorios y quimiotáxicos que generan todos los síntomas de la reacción [19-20].

La inhibición del COX se genera al ser aplicado un silenciamiento en una de las cadenas laterales de la serina presente en los isómeros COX, que catalizan ácido araquidónico, generando prostaglandina G₂, que luego se convierte en prostaglandina H₂ [20]. Esta última es un precursor en la formación de varias prostaglandinas, como E₂, que está relacionada con la inflamación y el aumento de la temperatura corporal.

Factores de riesgo

Existe una serie de síntomas ante una posible alergia a los AINEs, principalmente cutáneos y respiratorios. En la piel, pueden incluir enrojecimiento, comezón, inflamación en áreas sensibles, enrojecimiento de los ojos, entre otras complicaciones [21]. En la vía respiratoria, los síntomas pueden abarcar dificultad para respirar, asma y congestión nasal, generalmente apareciendo alrededor de 1 hora después de su ingesta. Las posibilidades de presentar alergia son del 1% en personas sanas, pero aumentan al 30% en aquellos con urticaria, pólipos nasales o asma preexistentes [22].

Una de las más severas que se puede presentar es la reacción anafiláctica, en la cual una hipersensibilidad inmediata ocasiona la activación e interconexión de varios IgE. Esta reacción ocurre cuando los IgE se unen a mastocitos y basófilos y se cruzan con el alérgeno, liberando moléculas como histamina y triptasa que producen enrojecimiento, hipotensión, broncoespasmos, taquicardia u otras respuestas fisiológicas [23].

Pruebas clínicas

En la actualidad no se cuenta con una prueba específica y sensible para detectar de previo alergias a los AINEs, por lo que su diagnóstico se da por identificación de los síntomas una vez que ocurren. Los alergólogos suelen revisar el historial médico, pero esto no es muy preciso, y si el paciente no ha sido expuesto previamente a estos fármacos tampoco habrá información disponible. En caso de sospecha, se realizan pruebas como las cutáneas, en las que se aplica

una pequeña cantidad del medicamento en forma de una pequeña herida o punzada en la piel y se trata de identificar la presencia de reacción alérgica, para evitar riesgos potenciales asociados con medicamentos inadecuados [2].

Se piensa que la reacción alérgica ante los AINEs se debe a la presencia previa de IgE en el cuerpo, generadas como consecuencia de la exposición previa a AINEs relacionados. La anafilaxia es una reacción alérgica grave que requiere de atención inmediata y no debe confundirse con la reacción anafilactoide, que, es clínicamente similar, pero ocurre sin la participación de IgE y se considera una intolerancia, no una alergia [23].

Para quienes padecen una alergia al AAS, la mejor recomendación es evitar su consumo. Por otro lado, para personas que deben consumirlo para tratar condiciones crónicas o cardiovasculares, se creó un tratamiento de “desensibilización”, que consiste en la administración muy regulada de dosis progresivas de aspirina hasta generar cierta resistencia, mostrando resultados muy positivos en cuanto a reducción de afecciones y hospitalizaciones [17-24].

Consumo y alternativas a los AINEs

Si bien los AINEs comprenden una variedad de medicamentos para el tratamiento del dolor, la fiebre y otras condiciones inflamatorias [1], existen alternativas viables que resultan muy beneficiosas debido a su baja incidencia de efectos secundarios. El ejemplo más destacado y ampliamente utilizado es el Paracetamol, que ofrece un efecto similar al de los AINEs en términos de eficacia terapéutica para el control de dolores agudos y crónicos [25].

Otras alternativas eficaces son los opioides recetados como la codeína, oxicodona, morfina, fentanilo entre otros, que debido a su estructura química presentan propiedades que inducen relajación y alivian el dolor [20]. Sin embargo, esta alternativa presenta como contraindicación relacionada a su alto riesgo de adicción, debido a posibles implicaciones psicológicas y emocionales, generando una dependencia hacia ellos [26].

Los analgésicos tópicos son una alternativa a los AINEs que pueden propiciar alivio en condiciones de dolor agudo o crónico en afecciones musculoesqueléticas [27]. Por ejemplo, la capsaicina es un compuesto proveniente de los chiles que genera una modulación neuronal del dolor por medio de apoptosis ya que induce a la fragmentación del ADN y reducción del núcleo generando la modulación de las neuronas sensoriales y que es más prolongada en condiciones inflamatorias [28].

Se debe considerar el tipo de afección la edad del paciente, la duración del tratamiento, y los efectos secundarios que pueda generar, con el fin de minimizar el riesgo de complicaciones en pacientes con enfermedades cardiovasculares, o renales, ya que los AINEs pueden incrementar el riesgo de ataques cardíacos y fallos renales, y se ha determinado que pacientes con edad avanzada presentan mayor tendencia a desarrollar este tipo de complicaciones renales y cardíacos [28-29].

Conclusiones

Los antiinflamatorios no esteroides (AINEs) constituyen una variedad de compuestos químicos. Estas sustancias se categorizan según su estructura química, y la clasificación está vinculada a su habilidad para inhibir las enzimas ciclooxigenasas.

La alergia al AAS se basa en una respuesta inmunológica mediada por IgE, que se desencadena cuando el AAS inhibe la COX-2, activando así a las inmunoglobulinas. Esto puede desencadenar síntomas en la piel y vías respiratorias, con riesgo de anafilaxia. En la actualidad no se cuenta con una prueba específica y sensible para detectar de previo alergias a los AINES,

por lo que el estudio del historial médico se vuelve una herramienta útil capaz de detectar la posible presencia de alergia por un paciente. La desensibilización es una opción para quienes, siendo alérgicos, requieren tratamiento con AAS, mostrando buenos resultados en la reducción de complicaciones.

Finalmente, los AINEs ofrecen alta efectividad, sin embargo, pueden presentar efectos adversos que se deben considerar durante la elección del tratamiento, así como el tipo y duración de la afección, y la edad, especialmente en pacientes con condiciones de salud preexistentes. A su vez los AINEs pueden aumentar el riesgo de problemas cardiovasculares y renales, por lo que se debe evaluar cuidadosamente su uso para posibles estudios posteriores.

Referencias

- [1] I. Ghlichloo y V. Gerriets, «Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs)», en *StatPearls [Internet]*, StatPearls Publishing, 2023. Accedido: 2 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK547742/>
- [2] S. Wöhrl, «NSAID hypersensitivity – recommendations for diagnostic work up and patient management», *Allergo J Int*, vol. 27, n.º 4, pp. 114-121, 2018. [10.1007/s40629-018-0064-0](https://doi.org/10.1007/s40629-018-0064-0)
- [3] H. Itoh, N. Yamashita, S. Kamijo, K. Masuda, H. Kato, y S. Yamaori, «Effects of acidic non-steroidal anti-inflammatory drugs on human cytochrome P450 4A11 activity: Roles of carboxylic acid and a sulfur atom in potent inhibition by sulindac sulfide», *Chemico-Biological Interactions*, vol. 382, p. 110644, sep. 2023, doi: [10.1016/j.cbi.2023.110644](https://doi.org/10.1016/j.cbi.2023.110644)
- [4] N. C. Huynh, T. T. T. Nguyen, D. T. C. Nguyen, y T. V. Tran, «Occurrence, toxicity, impact and removal of selected non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): A review», *Science of The Total Environment*, vol. 898, p. 165317, nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165317>
- [5] L. Meunier y D. Larrey, «Recent Advances in Hepatotoxicity of Non-Steroidal Anti-inflammatory Drugs», *Annals of Hepatology*, vol. 17, n.o 2, pp. 187-191, mar. 2018, doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.8633>
- [6] K. A. Ali, A. Maity, S. D. Roy, S. Das Pramanik, P. Pratim Das, y Md. A. Shaharyar, «Chapter 4 - Insight into the mechanism of steroidal and non-steroidal anti-inflammatory drugs», en *How Synthetic Drugs Work*, I. Kazmi, S. Karmakar, Md. A. Shaharyar, M. Afzal, y F. A. Al-Abbasi, Eds., Academic Press, 2023, pp. 61-94. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99855-0.00004-X>
- [7] N. F. Athow, P. M. Morgan, y G. A. Brown, «Hip and Knee Osteoarthritis, Not Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drugs, are Linked to Cardiac Disease», *The Journal of Arthroplasty*, May 2023, doi: [10.1016/j.arth.2023.05.026](https://doi.org/10.1016/j.arth.2023.05.026).
- [8] H. Al-Lawati, Z. Binkhathlan, y A. Lavasanifar, «Nanomedicine for the effective and safe delivery of non-steroidal anti-inflammatory drugs: A review of preclinical research», *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, vol. 142, pp. 179-194, sep. 2019, doi: [10.1016/j.ejpb.2019.06.025](https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2019.06.025).
- [9] M. J. van Dijk, J. de Wilde, M. Bartels, *et al.*, «Activation of pyruvate kinase as therapeutic option for rare hemolytic anemias: Shedding new light on an old enzyme», *Blood Reviews*, vol. 61, p. 101103, sep. 2023, doi: [10.1016/j.blre.2023.101103](https://doi.org/10.1016/j.blre.2023.101103).
- [10] D. W. Hein y L. M. Millner, «Arylamine N-acetyltransferase acetylation polymorphisms: paradigm for pharmacogenomic-guided therapy- a focused review», *Expert Opin Drug Metab Toxicol*, vol. 17, n.º 1, pp. 9-21, ene. 2021, doi: [10.1080/17425255.2021.1840551](https://doi.org/10.1080/17425255.2021.1840551).
- [11] Y. Jarrar y S.-J. Lee, «The Functionality of UDP-Glucuronosyltransferase Genetic Variants and their Association with Drug Responses and Human Diseases», *J Pers Med*, vol. 11, n.º 6, p. 554, jun. 2021, doi: [10.3390/jpm11060554](https://doi.org/10.3390/jpm11060554).
- [12] R. Warrington, F. Silviu-Dan, y T. Wong, «Drug allergy», *Allergy, Asthma & Clinical Immunology*, vol. 14, n.º 2, p. 60, sep. 2018, doi: [10.1186/s13223-018-0289-y](https://doi.org/10.1186/s13223-018-0289-y).
- [13] A. Qureshi y M. A. Fischer «Topical Calcineurin Inhibitors Revisited», *Archives of Dermatology*, vol. 143, n.º 4, pp. 543-551, abr. 2007, doi: [10.1001/archderm.143.4.545](https://doi.org/10.1001/archderm.143.4.545).
- [14] S. Bindu, S. Mazumder, y U. Bandyopadhyay, «Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) and organ damage: A current perspective», *Biochemical Pharmacology*, vol. 180, p. 114147, oct. 2020, doi: [10.1016/j.bcp.2020.114147](https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.114147).

- [15] A. Bruno, A. Contursi, S. Tacconelli, *et al.*, «The specific deletion of cyclooxygenase-1 in megakaryocytes/platelets reduces intestinal polyposis in ApcMin/+ mice», *Pharmacological Research*, vol. 185, p. 106506, nov. 2022, doi: [10.1016/j.phrs.2022.106506](https://doi.org/10.1016/j.phrs.2022.106506).
- [16] National Library of Medicine, "Acetylsalicylic Acid Action Pathway". Pubchem. PthBnk, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/pathway/PathBank:SMP0000083>
- [17] G. Cortellini, A. Raiteri, M. Galli, M. Lotrionte, F. Piscaglia, y A. Romano, «Acetylsalicylic acid challenge or desensitization in sensitive patients with cardiovascular disease», *J Thromb Thrombolysis*, vol. 55, n.º 4, pp. 762-769, may 2023, doi: [10.1007/s11239-023-02782-1](https://doi.org/10.1007/s11239-023-02782-1).
- [18] I. Doña, N. Pérez-Sánchez, I. Eguiluz-Gracia, R. Muñoz-Cano, J. Bartra, M. Torres, J. Cornejo-García., «Progress in understanding hypersensitivity reactions to nonsteroidal anti-inflammatory drugs», *Allergy*, vol. 75, n.º 3, pp. 561-575, 2020, doi: [10.1111/all.14032](https://doi.org/10.1111/all.14032).
- [19] N. Zhang, Z. Zhang, X. Wang. «The roles of basophils in mediating the immune responses», *European Journal of Inflammation*. 2021;19. doi: <https://doi.org/10.1177/205873922110476>
- [20] National Institute on Drug Abuse. «Prescription Opioids Drug Facts». *Presc. Op. DrgFac*. 2021. [En línea]. Disponible: <https://nida.nih.gov/publications/drugfacts/prescription-opioids>.
- [21] E. Mulkiewicz, D. Wolecki, K. Świacka, J. Kumirska, P. Stepnowski, y M. Caban, «Metabolism of non-steroidal anti-inflammatory drugs by non-target wild-living organisms», *Science of The Total Environment*, vol. 791, p. 148251, oct. 2021, doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.148251](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148251).
- [22] «ASCIA Guide for Milk Substitutes in Cow's Milk Allergy - Australasian Society of Clinical Immunology and Allergy (ASCIA). "Allergic reactions to aspirin and other pain killers"». Last update 2023 [En línea]. Disponible en: <https://www.allergy.org.au/hp/papers/guide-for-milk-substitutes-cows-milk-allergy>
- [23] D. Fischer, T. Vander-Leek, A. Ellis, H. Kim., «Anaphylaxis», *Allergy, asthma, and clinical immunology: official journal of the Canadian Society of Allergy and Clinical Immunology*, 14(Suppl 2), 54, 2018, doi: <https://doi.org/10.1186/s13223-018-0283-4>
- [24] U. Freo, C. Ruocco, A. Valerio, I. Scagnol, y E. Nisoli, «Paracetamol: A Review of Guideline Recommendations», *Journal of Clinical Medicine*, vol. 10, n.º 15, Art. n.º 15, ene. 2021, doi: [10.3390/jcm10153420](https://doi.org/10.3390/jcm10153420).
- [25] B. Cohen, L. J. Ruth, y C. V. Preuss, «Opioid Analgesics», en *StatPearls*, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023. Accedido: 1 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459161/>
- [26] J. Maloney, S. Pew, C. Wie, R. Gupta, J. Freeman, y N. Strand, «Comprehensive Review of Topical Analgesics for Chronic Pain», *Curr. Pain Headache Rep.*, vol. 25, n.º 2, p. 7, feb. 2021, doi: [10.1007/s11916-020-00923-2](https://doi.org/10.1007/s11916-020-00923-2).
- [27] V. Arora, J. N. Campbell, y M.-K. Chung, «Fight fire with fire: Neurobiology of capsaicin-induced analgesia for chronic pain», *Pharmacol. Ther.*, vol. 220, p. 107743, abr. 2021, doi: [10.1016/j.pharmthera.2020.107743](https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2020.107743).
- [28] A. Olry de Labry Lima, E. Salamanca-Fernández, E. J. Alegre del Rey, A. Matas Hoces, M. Á. González Vera, y C. Bermúdez Tamayo, «Safety considerations during prescription of non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs), through a review of systematic reviews», *An Sist Sanit Navar*, vol. 44, n.º 2, pp. 261-273, ago. 2021, doi: [10.23938/ASSN.0965](https://doi.org/10.23938/ASSN.0965).
- [29] A. Al-Azayzih *et al.*, «Nonsteroidal Anti-inflammatory Drugs Utilization Patterns and Risk of Adverse Events due to Drug-Drug Interactions among Elderly Patients: A Study from Jordan», *Saudi Pharmaceutical Journal*, vol. 28, n.º 4, pp. 504-508, abr. 2020, doi: [10.1016/j.jsp.2020.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jsp.2020.03.001).

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos que hemos utilizado una herramienta de Inteligencia Artificial (IA) *ChatGPT* para asistirnos en la redacción de este artículo. Esta herramienta nos ayudó a mejorar la estructura y la claridad del texto. Los contenidos generados por la IA fueron revisados minuciosamente por nosotros para asegurar su precisión y coherencia con el objetivo del estudio.

Además, utilizamos la misma herramienta de IA para traducir partes de este artículo. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.

Celulosa bacteriana: el biopolímero de la naturaleza

Bacterial Cellulose: Nature's Biopolymer

Milena Alvarado-Rojas¹, Josué Castro-Brenes², Fabián Orias-Obando³

Fecha de recepción: 15 de noviembre, 2023

Fecha de aprobación: 21 de marzo, 2024


Alvarado-Rojas, M; Castro-Brenes, J; Orias-Obando, F. Celulosa bacteriana: el biopolímero de la naturaleza. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 162-170.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6945>

1 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 ciris70@yahoo.es

2 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 joscbrenes@gmail.com

3 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 obandooriasfabian89@estudiantec.cr



Palabras clave

Biopolímeros; Bacterias; Bioandamios; Matriz Celular; Biocompatibilidad; Biodegradabilidad.

Resumen

La celulosa bacteriana (CB) es un biopolímero de relevancia en investigación e industria, producido por bacterias, como *Acetobacter* y *Komagataeibacter*. La CB comparte composición molecular similar a la celulosa vegetal (C₆H₁₀O₅), compuesta por dos subunidades (I y II) y un grado de polimerización de 2000 a 6000 unidades, basado en enlaces glucosídicos β-1,4 que forman una estructura tridimensional reticular y cristalina. Es un compuesto naturalmente biocompatible, no tóxico y versátil, con propiedades de biodegradabilidad y sostenibilidad debido a sus componentes de polisacáridos y grupos proteicos. Además, debido a su maleabilidad permiten interacciones beneficiosas con tejidos en recuperación y posee una mayor retención de agua a través de su estructura porosa. La CB se aplica en diversas industrias, incluyendo salud (sustitutos de piel, tejidos periodontales, procedimientos quirúrgicos), alimentos (aditivos, emulsionantes, fibras dietéticas, matrices poliméricas para empaques), textil (bolsos, carteras, collares, zapatos) y electrónica (diafragmas acústicos de alta fidelidad, conductividad eléctrica y dispositivos de luz). La CB presenta un gran potencial para su mayor uso a futuro, considerando los medios para su producción a gran escala, tales como el método estático, empleado a nivel de laboratorio, y el método agitado con una mayor transferencia de oxígeno.

Keywords

Biopolymers; Bacteria; Bio-scaffolds; Cell Matrix; Biocompatibility; Biodegradability.

Abstract

Bacterial cellulose (BC) is a biopolymer of relevance in research and industry, produced by bacteria such as *Acetobacter* and *Komagataeibacter*. BC shares a molecular composition similar to plant cellulose (C₆H₁₀O₅), composed of two subunits (I and II) and a degree of polymerization ranging from 2000 to 6000 units, based on β-1,4 glucosidic bonds that form a reticular and crystalline three-dimensional structure. It is a naturally biocompatible, non-toxic, and versatile compound, with biodegradable and sustainable properties due to its polysaccharide and protein group components. Furthermore, its malleability allows beneficial interactions with tissues in recovery, and it possesses enhanced water retention through its porous structure.

BC finds application in various industries, including healthcare (skin substitutes, periodontal tissues, surgical procedures), food (additives, emulsifiers, dietary fibers, polymeric matrices for packaging), textiles (bags, wallets, necklaces, shoes), and electronics (high-fidelity acoustic diaphragms, electrical conductivity, and light devices). BC holds great potential for increased future use, considering methods for large-scale production, such as the static method used at the laboratory level and the agitated method with increased oxygen transfer.

Definición de la celulosa bacteriana

La celulosa bacteriana (CB) es un biopolímero de gran interés en la investigación y la industria. Se trata de un compuesto producido por bacterias como las del género *Acetobacter* y *Komagataeibacter*, a través de un proceso de biosíntesis. A diferencia de la celulosa de origen

vegetal, la CB se distingue por su estructura altamente pura y homogénea. Destacándose por su biocompatibilidad, lo que la hace especialmente atractiva para diversas aplicaciones biotecnológicas y biomédicas [1].

La síntesis de celulosa ocurre en el interior de las células bacterianas, donde las enzimas responsables de su producción ensamblan las cadenas de glucosa. Posteriormente, este biopolímero se extruye y forma una matriz tridimensional. La capacidad única de formar una matriz tridimensional durante su extrusión confiere a la CB una versatilidad excepcional, lo que la convierte en un recurso valioso para la fabricación de materiales avanzados y productos biocompatibles. Su estructura y propiedades físicas pueden ser adaptadas de manera precisa para satisfacer las demandas de aplicaciones específicas [2].

Por lo anterior, el objetivo de esta revisión es recapitular de manera general las principales características de la CB. Se abordan aspectos relacionados con su síntesis de celulosa, su estructura única y sus propiedades físicas y químicas, junto con un análisis de sus aplicaciones en industrias como la de salud, alimentos, textil y electrónica. Además, se destaca la importancia de la CB como alternativa sostenible y biodegradable en un contexto global de creciente conciencia ambiental. El enfoque hacia la mejora de los procesos de producción a gran escala se presenta como un paso crucial para aprovechar plenamente el potencial de este biomaterial versátil y prometedor en la innovación industrial

Importancia industrial de la celulosa

Un polisacárido esencialmente omnipresente en la naturaleza, ocupa un lugar preeminente en una amplia variedad de industrias, gracias a sus propiedades físicas y químicas únicas. Su capacidad la distingue como un recurso versátil y valioso [3].

Una de las principales aplicaciones industriales de la celulosa se encuentra en la producción de materiales celulósicos, los cuales son utilizados en la fabricación de productos de consumo cotidiano. La celulosa, a través de procesos de extracción y purificación, se convierte en una materia prima esencial en la elaboración de productos como papel, cartón, tejidos y textiles. Estos materiales desempeñan un papel central en la sociedad moderna, siendo fundamentales en la comunicación escrita, embalaje, confección de prendas de vestir y otros muchos productos [4].

En el contexto contemporáneo caracterizado por una creciente conciencia ambiental, la celulosa ha adquirido un estatus destacado como materia prima sostenible. Su prominencia radica en su capacidad inherente de biodegradación y su condición de recurso renovable, lo que la posiciona como una alternativa altamente respetuosa con el medio ambiente en la producción de una amplia gama de productos [5].

La celulosa, al ser susceptible de degradarse en componentes naturales y volver a entrar en los ciclos biogeoquímicos, ofrece una solución esencial para abordar los desafíos ambientales actuales. Su contribución a la sostenibilidad se manifiesta en la reducción significativa de la acumulación de residuos sólidos y la disminución de la dependencia de recursos no renovables en la fabricación de productos cotidianos [6].

Este enfoque hacia la celulosa como recurso sostenible se alinea con la creciente necesidad global de mitigar la huella de carbono y fomentar prácticas económicas más respetuosas con el medio ambiente. En un momento en que la sociedad y las industrias buscan activamente reducir su impacto ambiental, la forma en que la celulosa se sintetiza y se estructura internamente se revela como un factor esencial de la celulosa, representando un avance crucial en la dirección de una economía más sostenible y equitativa [7].

Producción de Celulosa Bacteriana

La producción de CB se posiciona como un campo de estudio de creciente relevancia. Comprender en profundidad este proceso implica una exploración minuciosa de sus elementos esenciales, desde los microorganismos involucrados hasta los factores ambientales que modelan su producción, junto con las técnicas de cultivo que rigen su obtención [5].

En el epicentro del proceso se encuentran los microorganismos, cuya singularidad bioquímica y capacidad intrínseca para la biosíntesis de celulosa han capturado la atención de investigadores. Entre las cepas de especial relevancia se destacan *Acetobacter xylinum* y *Komagataeibacter xylinus*, organismos que exhiben una extraordinaria aptitud para la excreción de celulosa extracelular durante su ciclo vital. Este fenómeno biológico, relacionado con la excreción meticulosa de celulosa extracelular por parte de los microorganismos, es la base de la producción eficiente de celulosa [8]. La producción de CB está estrechamente vinculada a factores ambientales cuya gestión precisa es crucial para obtener los resultados deseados.

La temperatura de cultivo, generalmente mantenida en un rango termodinámico de 25-30°C, es importante en el desarrollo de la producción celulósica. Sin embargo, esta cifra puede ser objeto de ajustes específicos en función de la cepa bacteriana empleada y las variables de producción. De manera análoga, el pH del medio de cultivo desempeña un papel de relevancia, con un rango óptimo de actividad enzimática que oscila entre 5.5 y 7.0, aunque nuevamente, este parámetro puede ser sometido a ajustes particulares según la especie bacteriana y el sustrato utilizado. La disponibilidad de nutrientes, comprendiendo fuentes de carbono, nitrógeno y oligoelementos, influencia en el crecimiento bacteriano y, por consiguiente, en la producción de celulosa. La gestión de estos componentes es indispensable para sustentar un crecimiento bacteriano saludable y el desarrollo de una celulosa de elevada calidad [9].

La fase de inoculación, implica la introducción de la cepa bacteriana en un medio de cultivo estéril, durante un período de tiempo definido. La agitación y oxigenación, aseguran la homogeneidad en la distribución de nutrientes y oxígeno en el cultivo. Finalmente, una vez que se alcanza la cantidad deseada de celulosa, se procede a su recolección, lavado y procesamiento subsiguiente, preparándose para su uso. [3].

Estructura de la Celulosa Bacteriana

La CB presenta una composición molecular análoga a la celulosa vegetal (C₆H₁₀O₅). Está compuesta por dos subunidades, I y II, y exhibe un grado de polimerización que varía entre 2000 y 6000 unidades. Su estructura se fundamenta en enlaces glucosídicos β-1,4 que forman una tridimensionalidad reticular. Su diámetro se sitúa en un rango de 10 a 50 nm y longitud de 100 a 1000 nm, lo que confiere una naturaleza fibrosa. Destaca por su rica presencia de puentes de hidrógeno, estableciendo una fuerte cohesión molecular. Las fibras pueden traslaparse a través de fuerzas de van der Waals, generando estructuras cristalinas organizadas [10].

Posee una elevada concentración de fases I_α, lo cual corresponde a un ordenamiento estructural triclinico. En este patrón, las cadenas de celulosa se organizan helicoidalmente entre planos paralelos, facilitando interacciones intermoleculares mediante fuerzas de Van der Waals. Esta disposición contribuye de manera significativa a un alto grado de cristalinidad, que oscila entre un 50% y un 95%. Este grado de cristalinidad es una característica distintiva que la diferencia de otras formas menos cristalinas, como la celulosa vegetal [11,12].

Celulosa bacteriana vrs. vegetal

Comparada con la celulosa de origen vegetal, la CB exhibe una mayor pureza. La celulosa vegetal presenta una composición que abarca no sólo celulosa, sino también hemicelulosa, lignina y pectina, componentes que resultan difíciles de separar. A pesar de que inicialmente la CB no es completamente pura debido a la presencia de células bacterianas, nutrientes y metabolitos. En el proceso de purificación de pellets de CB, se inicia tratándolos con soluciones alcalinas a 100 grados Celsius durante 15-20 minutos para eliminar eficazmente las células bacterianas. Luego, se aíslan los pellets de la solución alcalina mediante técnicas de separación físicas o químicas. Finalmente, los pellets purificados se lavan con agua destilada para recuperar un pH neutro, eliminando residuos alcalinos y restaurando el equilibrio de la CB [13].

La significativa rigidez de la CB encuentra su explicación en la relevancia crítica de los puentes de hidrógeno presentes en su estructura. Esta rigidez sobrepasa a la de la celulosa vegetal debido al grosor nanoscópico de sus fibras, lo que se traduce en una mayor concentración de grupos hidroxilo y una superficie interna altamente desarrollada. La configuración molecular y su estructura en escalas nanométricas permiten la precisa alineación de las fibrillas dentro de la estructura, generando una estructura entrelazada y compacta a través de una red de puentes de hidrógeno y diámetros más extensos. Esta organización molecular altamente ordenada contribuye significativamente a la alta resistencia que caracteriza a este tipo de compuesto en comparación con otros tipos de celulosa [14].

Adicionalmente, se observa una mayor resistencia a la tracción, mayor flexibilidad y mejor resistencia a la solubilidad en la mayoría de los disolventes. Aunque es cien veces más delgada que las fibras de celulosa vegetal, mantiene una notable retención estructural, lo que le confiere versatilidad para adquirir diversas formas tridimensionales durante el proceso de fermentación [15].

Propiedades

Al ser un compuesto orgánico natural, la CB manifiesta un alto grado de biocompatibilidad, atribuido a su similitud química con la celulosa vegetal. Su biocompatibilidad ha sido validada, resaltando su no toxicidad y versatilidad. Su maleabilidad y estructura porosa permiten una interacción beneficiosa con células, facilitando la adhesión y proliferación celular, así como su integración efectiva con los tejidos huéspedes. Además, posee la capacidad de absorber exudados de tejidos cicatrizantes y ayuda a la granulación acelerada o formación de tejido conectivo nuevo [16,17].

Igualmente, se la clasifica como una molécula biodegradable y sostenible debido a su composición de polisacáridos y grupos proteicos, junto con enlaces glucosídicos, y manteniendo una alta pureza libre de compuestos interferentes. La CB es propensa a la descomposición sencilla por parte de microorganismos como bacterias y hongos a través de procesos enzimáticos, lo que resulta en la obtención de componentes de menor peso molecular que pueden ser utilizados en procesos biológicos y que no son contaminantes ambientales [18,19].

La capacidad de retención de agua es una característica distintiva y esencial que se debe a la naturaleza porosa de su estructura, donde los poros actúan como atractores de agua. Los enlaces de hidrógeno presentes en las fibrillas de celulosa atraen y mantienen el agua internamente, permitiendo una retención en su red tridimensional. Además, la CB exhibe una alta tensión superficial y un carácter hidrofílico, lo que significa que tiene afinidad por el agua,

facilitando aún más su capacidad para retenerla. En consecuencia, la cantidad de agua que puede retener por unidad de peso seco es considerable, llegando a ser hasta 100 o incluso 200 veces su propio peso seco en condiciones óptimas [20].

Aplicaciones de la celulosa bacteriana

La celulosa bacteriana ha tenido múltiples usos industriales a día de hoy [19], por ejemplo, en la salud, alimentos, industria textil, electrónica y de tecnología.

La industria de la salud ha sido una de las más beneficiadas por la producción de la CB [3], debido a que las películas de este material poseen una alta fuerza mecánica cuando están hidratadas, su alta permeabilidad a líquidos y gases, además de la poca irritación que esta provoca en su contacto, [21] motivan a su uso, como por ejemplo, en los sustitutos de piel en caso de quemaduras de segundo o tercer grado como los realizados por Biofill® [22] y Gengiflex® que utilizan la CB para tejidos periodontales en recuperación [23]. La CB se utiliza además como biomaterial para aplicaciones en microcirugías como BASYC®, que la utiliza para arterias y venas [24], o Cellumed® que la utiliza para la terapia de úlceras en caballos [25].

Por las capacidades antimicrobianas de la CB esta se ha utilizado con objetivos biomédicos [26], por ejemplo, en la elaboración de matrices con aplicaciones en periodoncia, ofreciendo resultados positivos en las pruebas de inhibición microbiana, o en la creación de hidrogeles, donde se demostró que si la CB es enriquecida con hidróxido de calcio y digluconato de clorhexidina, se observa poca actividad microbiana, lo que permitiría utilizar este biopolímero para procedimientos de regeneración de tejidos, como es en el caso de la exclusión de tejido blando en defectos óseos. [27].

En la industria de los alimentos también ha sido sumamente importante la CB [28], al usarse por ejemplo, como aditivo de alimentos, emulsificante o como fibra dietética debido a su textura y contenido de fibra, como es el caso de Cellulon, un agente de carga usado como reductor de calorías [29], o en bebidas dietéticas como aditivo, como en la Kombucha, o como refuerzo de matrices poliméricas para los empaques de alimentos, debido a sus propiedades mecánicas, alta relación superficie/volumen, su biodegradabilidad y la pureza que posee este compuesto en comparación con la celulosa vegetal, que al ser purificada resulta no alergénica y biocompatible [30].

Por otro lado, se han desarrollado múltiples prototipos de uso textil con base en la CB [31] como bolsos, carteras, collares o zapatos, que además de poseer una alta resistencia y variedad, poseen características sumamente importantes en los tiempos actuales, como su biodegradabilidad, siendo la CB un biomaterial, que promete ser una excelente alternativa a los tradicionales que provocan una alta contaminación [32] mientras que los productos en base a este material pueden desecharse con una baja probabilidad de provocar contaminación o pueden ser usados como compost [33].

En la industria de la electrónica y tecnología, la CB ha demostrado poseer una alta capacidad sónica, similar a las películas de aluminio o titanio, lo que ha permitido crear diafragmas de alta fidelidad acústica en microfones y audífonos, como los creados por Sony Corp. [3] Además, ha sido utilizada en transductores acústicos, esto debido a que al ser sometida a un tratamiento químico adquiere una alta resistencia mecánica. [34] Asimismo, también se han desarrollado membranas con alta conductividad eléctrica y dispositivos emisores de luz, ambos, por medio de la incorporación de metales en la estructura de este material.[35]

Por todas estas aplicaciones, es importante mencionar el potencial de la CB, esto considerando los medios de producción a gran escala de este material, actualmente la CB se produce por dos métodos: el estático, empleado a nivel de laboratorio, y el método agitado, que produce una mayor transferencia de oxígeno, favoreciendo la producción de celulosa, sin embargo, genera el problema de inducir a la célula una pérdida en su capacidad de producir celulosa, es por esta razón que en los últimos años se han desarrollado distintas estrategias para una mayor producción de celulosa sin ver afectada esta capacidad, por ejemplo, un estudio en Colombia inoculó un cultivo de bacterias *Acetobacter* con agua, demostrando al final, que se produce mayor cantidad de celulosa que con los métodos tradicionales [36]. Asimismo, se puede mencionar un estudio realizado en Chile, donde por medio de la utilización de microalgas y luminosidad constante, se logró optimizar la producción de CB casi el doble que en los métodos tradicionales, esto debido a que las microalgas son una excelente fuente de oxígeno, además de que son fáciles de manejar y son económicamente rentables [37] Por otro lado, un estudio realizado en Bogotá, demostró, que el valor de producción de CB es mucho más económico que el de otros materiales que son utilizados en las industrias, tales como: el PVC, PC, PS o PE [38].

Conclusión

La CB se destaca como un compuesto altamente eficiente y prometedor en los ámbitos de investigación e industria, gracias a su combinación única de propiedades físicas, químicas y estructurales. Su relevancia adquiere particular importancia en aplicaciones médicas, donde su marcada biocompatibilidad sugiere usos desde procedimientos quirúrgicos hasta la regeneración de tejidos. La versatilidad de este material y su potencial impacto en la medicina anticipan un futuro donde la CB jugará un papel crucial en innovaciones médicas y tecnológicas.

Industrialmente, la CB presenta innovaciones prometedoras para sectores clave como textiles y alimentos. Su biodegradabilidad, resistencia y funcionalidad la convierten en una base sólida para la creación de biopolímeros novedosos, con potencial para fabricar productos industriales de alto valor como implementos de vestir y films alimenticios. Además, su incorporación en la industria electrónica puede facilitar la producción de dispositivos de alta calidad y rendimiento al integrarse con metales y otros materiales conductores.

En el futuro, es importante optimizar los procesos de producción a escala industrial e identificar metodologías eficientes como el método estático o agitado para reducir los costos de fabricación. Esto provocaría una mayor demanda e implementación de la celulosa bacteriana y sus derivados en diversas áreas y aplicaciones industriales. Con un enfoque en la mejora continua y la eficiencia en la producción, la CB se posiciona como un recurso fundamental en la próxima etapa de la innovación industrial, brindando soluciones sostenibles, innovadoras y de alto rendimiento.

Referencias

- [1] E. Alata Mayhuire, Y. Cuadros Huamaní, L. Miranda Zanardi y E. Medina de Miranda, "Biopelículas producidas con cáscara de naranja y reforzadas con celulosa bacteriana," *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 85, no. 2, feb., pp. 231-241, 2019.
- [2] C. Buruaga Ramiro, "Funcionalización enzimática de la celulosa bacteriana para su aprovechamiento y valorización," Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, Ciudad de Barcelona, Barcelona, 2021.
- [3] J. L. C. Pacheco, S. K. M. Yee, M. L. C. Zentella y J. E. E. Marvan, "Celulosa bacteriana en *Gluconacetobacter xylinum*: biosíntesis y aplicaciones," *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 7, (1), mar., pp. 18-25, 2004.

- [4] A. Requejoa y N. Santosb, "La Biorrefinería: caminando hacia un desarrollo sostenible," *Pasaje a la ciencia*, vol. 8, (22), jun., pp. 8-16, 2021.
- [5] S. González Arranz, "Diseño de un nuevo material sostenible a partir de celulosa bacteriana de residuos orgánicos de producción local en un marco de economía circular," Tesis de Bachillerato, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad de Madrid, Madrid, 2021.
- [6] A. C. Valdez Manzaba, "Influencia de los microorganismos eficientes en el aprovechamiento ecológico de residuos orgánicos", Bachelor 's thesis, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Santa Elena, 2023.
- [7] P. Ruiz Masegosa, "Tejidos con protección solar y baja coloración a partir de extractos de residuos orgánicos," Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València, Ciudad de Valencia, Valencia, 2023.
- [8] J. A. Toscano Avila, "Estimación de vida útil de mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*) a partir del recubrimiento de celulosa bacteriana producida por *Komagataeibacter xylinus*," Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Tungurahua, 2019.
- [9] G. O. Jean, "Aplicación de microalgas para la remoción de nutrientes en efluentes agrícolas: Revisión de literatura," Tesis de Bachillerato, Universidad Zamorano, San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, 2020.
- [10] D. Lahiri *et al.*, "Bacterial Cellulose: Production, Characterization, and Application as Antimicrobial Agent", *IJMS*, vol. 22, (23), nov., p. 12984, 2021.
- [11] G. Gayathri y G. Srinikethan, "Bacterial Cellulose production by *K. saccharivorans* BC1 strain using crude distillery effluent as cheap and cost effective nutrient medium", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 138, (1), oct., pp. 950-957, 2019.
- [12] E. K. Gladysheva, E. A. Skiba, V. N. Zolotukhin, y G. V. Sakovich, "Study of the Conditions for the Biosynthesis of Bacterial Cellulose by the Producer *Medusomyces gisevii* Sa-12", *Appl Biochem Microbiol*, vol. 54, (2), mar., pp. 179-187, 2018.
- [13] C. Zhong, "Industrial-Scale Production and Applications of Bacterial Cellulose", *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 8, (1), dic., p. 605374, 2020.
- [14] Z. N. Skvortsova, T. I. Gromovoykh, V. S. Grachev, y V. Yu. Traskin, "Physicochemical Mechanics of Bacterial Cellulose", *Colloid J*, vol. 81, (4), jul., pp. 366-376, 2019
- [15] B. V. Mohite y S. V. Patil, "A novel biomaterial: bacterial cellulose and its new era applications: BC and Its New Era Applications", *Biotechnology and Applied Biochemistry*, vol. 61, (2), mar., pp. 101-110, 2014.
- [16] R. Portela, C. R. Leal, P. L. Almeida, y R. G. Sobral, "Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications", *Microbial Biotechnology*, vol. 12, (4), jul. pp. 586-610, 2019.
- [17] S. Torgbo y P. Sukyai, "Bacterial cellulose-based scaffold materials for bone tissue engineering", *Applied Materials Today*, vol. 11, (1), jun., pp. 34-49, 2018.
- [18] T. Garrison, A. Murawski, y R. Quirino, "Bio-Based Polymers with Potential for Biodegradability", *Polymers*, vol. 8, (7), jul., p. 262, 2016.
- [19] I. Kamaruddin, A. Dirpan, y F. Bastian, "The novel trend of bacterial cellulose as biodegradable and oxygen scavenging films for food packaging application : An integrative review", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 807, (2), jul., p. 022066, 2021.
- [20] M. Ul-Islam, T. Khan, y J. K. Park, "Water holding and release properties of bacterial cellulose obtained by in situ and ex situ modification", *Carbohydrate Polymers*, vol. 88, (2), abr., pp. 596-603, 2012.
- [21] C. J. Grande Cruz, "Desarrollo De Nanocompuestos De Celulosa Bacteriana Para Aplicaciones Biomédicas.", Tesis de Bachillerato, Universitat de València, Ciudad de Valencia, Valencia, 2014.
- [22] W. K. Czaja *et al.*, "The Future Prospects of Microbial Cellulose in Biomedical Applications," *Biomacromolecules*, vol. 8, (1), Dec., pp. 1-12, 2007
- [23] H. G. de Oliveira Barud *et al.*, "Bacterial nanocellulose in dentistry: perspectives and challenges," *Molecules*, vol. 26, (1), dec., pp. 49, 2021.
- [24] D. Klemm *et al.*, "Bacterial synthesized cellulose—artificial blood vessels for microsurgery," *Progress in Polymer Science*, vol. 26, (9), mar., pp. 1561-1603, 2001.
- [25] H. P. Schmauder *et al.*, "Bakterienzellulose-ein inter-essantes biomaterial," *Bioforum*, vol. 23, (7/8), jan., pp. 484-486, 2000.
- [26] C. A. R. Giraldo, "La celulosa bacteriana: un mundo de nanosposibilidades," *Universitas Científica*, vol. 16, Jan., pp. 6-9, 2013.

- [27] K. L. T. Carrillo *et al*, "Elaboración de matrices de celulosa con propiedades antimicrobianas para su aplicación en periodoncia," *Revista Mexicana De Periodontología*, vol. 12, (1-3), oct., pp. 7-11, 2021.
- [28] L. D. C. Pineda, L. A. C. Mesa and C. A. M. Riascos, "Técnicas de fermentación y aplicaciones de la celulosa bacteriana: una revisión," *Ingeniería Y Ciencia*, vol. 8, (16), Jul., pp. 307-335, 2012.
- [29] D. N. Thompson and M. A. Hamilton, "Production of bacterial cellulose from alternate feedstocks," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 91, (1-9), Mar., pp. 503-513, 2001.
- [30] A. Labeaga Viteri, "Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones," Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Educación a Distancia (España), Ciudad de Madrid, Madrid, 2018.
- [31] A. G. B. Flores, "Moda y biotecnología: creación de nuevos biotextiles para una industria textil sostenible," *Rd-Icuap*, vol. 7, (21), sep., pp. 185-199, 2021.
- [32] Y. Y. Jiménez-Sánchez, "APLICACIÓN DE LA CELULOSA BACTERIANA EN EL DISEÑO DE PRODUCTOS: UN CAMINO A LA SUSTENTABILIDAD," *Diseño Arte Y Arquitectura*, vol 1, (11), dec., pp. 41-57, 2021.
- [33] L. N. Gómez Rodríguez, "Análisis de celulosa bacteriana, como propuesta de fibra textil para el desarrollo de una chaqueta masculina en pacientes con hiperhidrosis, en la ciudad de Bucaramanga en el primer periodo del 2021," Tesis de Bachillerato, Universidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Santander, 2021.
- [34] L. D. Carreño Pineda, "Efecto De Las Condiciones De Cultivo Y Purificación Sobre Las Propiedades Físicoquímicas Y De Transporte En Membranas De Celulosa Bacteriana," Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Ciudad de Bogotá, Bogotá, 2011.
- [35] C. Legnani *et al*, "Bacterial cellulose membrane as flexible substrate for organic light emitting devices," *Thin Solid Films*, vol. 517, (3), dec., pp. 1016-1020, 2008.
- [36] L. A. Caicedo, F. P. Da França and L. Lopez, "Factores para el escalado del proceso de producción de celulosa por fermentación estática," *Revista Colombiana De Química*, vol. 30, (2), dec., pp. 155-162, 2001.
- [37] D. E. Sandoval Vargas, "Evaluación del rendimiento de producción de celulosa bacteriana usando microalgas como fuente sustentable de oxígeno," Tesis de Bachillerato, Universidad de Chile, Region Metropolitana de Santiago, Santiago, 2017.
- [38] S. A. Gordillo Medina and M. P. Rodríguez Godoy, "Evaluación técnica y análisis de costos para el proceso de producción de biofilm aprovechando residuos de papel de oficina generados por la Empresa International House Bogotá," Tesis de Bachillerato, Universidad de América, La Candelaria, Bogotá, 2022.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Application of commercial sand aggregates in hydrophobized hydraulic concrete materials

Utilización de arenas comerciales en materiales de concreto hidrofobizados

Ernesto Mora¹, Erick Castellón²

Fecha de recepción: 2 de noviembre, 2023
Fecha de aprobación: 6 de marzo, 2024

Mora, E; Castellón, E. Application of commercial sand aggregates in hydrophobized hydraulic concrete materials. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 171-183.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6934>



- 1 Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
 ernesto.mora@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7966-8502>
- 2 Escuela de Química y CICIMA, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
 erick.castellon@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5888-8706>

Keywords

Concrete matrix; hydrophobic particles; porous-media; characterization; water transport.

Abstract

Because precursors such as sand are generally accessible, concrete has become a widely used construction material. Not all available sands, however, fulfill the requirements of purity, granulometry, shape and porosity for use in concrete materials. Here we report the setting of the hydrophobicity of hydraulic concrete matrices prepared with commercial sands and hydrophobic silica particles (dodecyl-modified silica) added to their mixtures. The granulometry and porosity of the selected fine aggregates were confirmed to influence the water absorption of hydrophobized concrete matrices. Water absorption decreased more than 30 % on addition of silica hydrophobized with dodecyl. As the functionalization was performed from the mix prepared with commercial sands, an improved hydrophobicity of the materials was provided integrally to the matrix.

Palabras clave

Caracterización de arenas; concreto; partículas hidrofóbicas; matriz; porosidad; transporte de agua.

Resumen

El concreto hidráulico es uno de los materiales de construcción más empleados debido a la ubicuidad de sus precursores: agua, cemento, agregados finos y gruesos. Uno de los agregados principales es la arena, sin embargo, no todas las arenas disponibles cumplen los requisitos de idoneidad, pureza, graduación, forma y porosidad. Algunas soluciones para el mejoramiento de arenas para su uso en la fabricación de concreto hidráulico son la combinación de agregados finos, uso de aditivos, alternativas de reemplazo e incremento en la cantidad de cemento, entre otras posibilidades remediales. Este artículo describe la formulación de materiales de concreto hidrofóbicos con tres tipos de arenas (con porosidades, granulometrías y finuras diferenciadas entre sí). La hidrofobización del concreto se realiza al incorporar partículas de sílices modificadas químicamente y se estudia la interacción de estas partículas con las diferentes arenas. Se confirmó que la graduación y la porosidad de los agregados finos seleccionados influye en la absorción de agua de las matrices de concreto, sin embargo, se logra una mejora de más del 30% en la hidrofobicidad de la matriz al agregar sílice hidrofóbica.

Introduction

Hydraulic concrete and its precursor components are widely available sources of raw materials for construction purposes [1-6]. Despite the apparent simplicity of the technology of the conventional production of hydraulic concrete, the microstructure of the product is complicated, containing a heterogeneous distribution of several solid composites, including voids of various shapes and sizes that might be completely or partially filled with solutions related to the hydration [5,7,8]. Unlike other materials such as steel, plastic and ceramics, concrete is not totally inert or static; the durability conditions of the material are governed by the complicated microstructure of its matrix.

In concrete matrices, the paste and fine aggregates importantly determine the general characteristics of water transport through the materials. Adjusting the hydrophobicity of concrete matrices can benefit the durability of the materials on decreasing the passage of water through

them; this situation minimizes damage from volumetric changes, abrasion, and intrusion of external agents. Two aspects must, however, be controlled: the fraction of water to cement, and the selection of fine aggregates. To select these aggregates, one should consider their source, shape of grain, porosity, purity and granulometry. [4-6,9,10]

In addition, the sand or fine aggregate interacts directly in the matrix. In general, common sand for use in concrete mixtures is a derivative of a rock cycle process. Sand can be specifically defined in terms of its particle size; this material passes through a sieve 4.75 mm × 4.75 mm (No. 4 sieve) and is predominantly retained on a sieve 0.075 mm × 0.075 mm (No. 200 sieve) [6,11,12]. For experimental purposes there are sand options such as those described in the ASTM standards C778 and 20-30. For commercial purposes, sand types can be classified according to source (quarry sand or river sand), and to its industrial processing (for example, level of grinding, washing, and sieving).

For example, a fresh concrete containing fine aggregates of poor quality in terms of distribution of granulometry, is susceptible to segregation during consolidation. Also, if the sand grains have a laminar shape, the concrete strength might be affected; if the aggregate has impurities, such as organic matter (clayey sand), excess salts (sea sand) or acids (volcanic sand) it might affect the concrete stability, adherence, and durability. The characteristics of the transition zone also influence concrete durability; hence the influence of the fine aggregate on the hydrophobicity of a hydraulic concrete matrix requires analysis. [5-7,13]

Sand is a material widely available in the American tropics, but in other regions the sands of river basins might have poor granulometry distribution, or the predominant sand is unsuitable for use in concrete mixtures. It is hence relevant to conduct studies of the use of sea sand, dune sand or other deposits. Combinations or partial replacements are proposed as alternatives [14-17]. In Costa Rica, Central America, the sands typically commercially available and frequently used are quarry sands (from the Santa Ana - Alajuela area) and river sands (from the Atlantic, North, or Pacific areas). After a simple industrial treatment, these sands generally fulfill the desirable conditions to produce hydraulic concrete mixtures, in accordance with the best construction practices.

Here we report the adjustment of the hydrophobicity of hydraulic concrete matrices prepared with commercial sands with hydrophobic silica particles (dodecyl-modified silica) added to their formulations. As the functionalization was performed during the formulation of the concrete materials prepared with commercial sands, the improved hydrophobicity of the materials was conferred to its integrity, not merely to the molding surfaces.

Materials and methods

Synthesis of hydrophobic silica particles

The hydrophobic silica particles were synthesized according to a reference process [18]. These silica particles (pyrogenic silica, Wacker HDR N20, average diameter 220 nm) were degassed and dried in an oven at 120 °C for 2 h under decreased pressure. After being dried, the silica particles (30 g) were dispersed in heptane (1 L, Aldrich) in a spherical flask (2 L); the mixture was stirred for 30 min. Diethylamine was added as a catalyst (2.3 mL, Aldrich); the mixture was magnetically stirred and refluxed at 87 °C.

After adding *n*-dodecyltriethoxysilane (4.40 mL, Aldrich), the mixture was refluxed for 2 h. A Dean-Stark trap was subsequently used to eliminate at least 40 % of the solvent; the remaining solvent was extracted with a rotary evaporator. The *n*-dodecyl-functionalized silica particles were dried at 100 °C for 8 h in an oven and stored.

Fine aggregates: characterization

Three fine aggregates were selected for the experiments (Ottawa-A, river-B and quarry-C). Marked differences in their absorptions were detected. In addition, granulometries, fineness module (F), specific gravity and absorption were assessed. [19,20]

The samples and curves of size distribution of the three sands (A, B, C) are displayed in Figures 1 and 2 respectively.

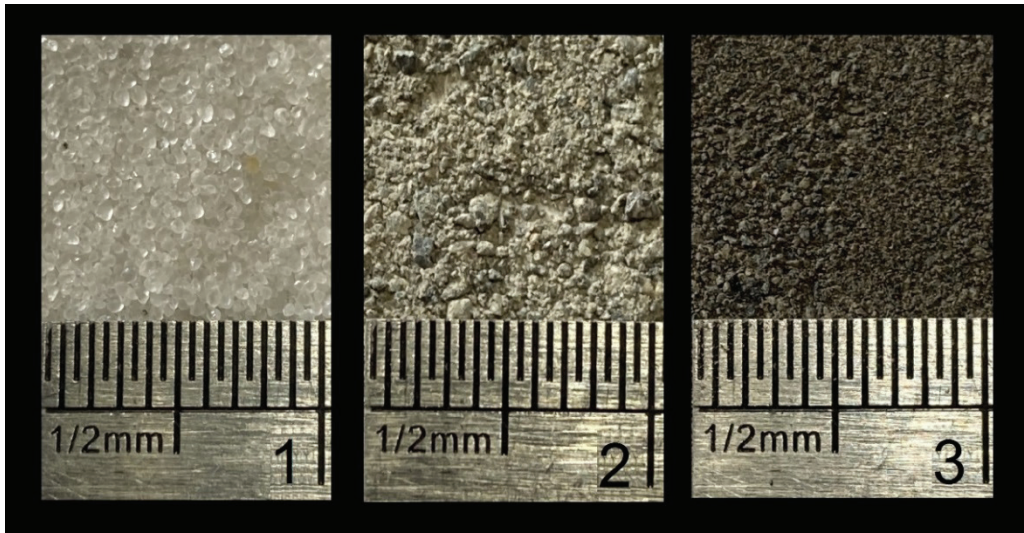


Figure 1. Fine aggregates selected for the experiments, (1) Ottawa sand—A, (2) river sand—B and (3) quarry sand—C. The photographs have width 10 mm.

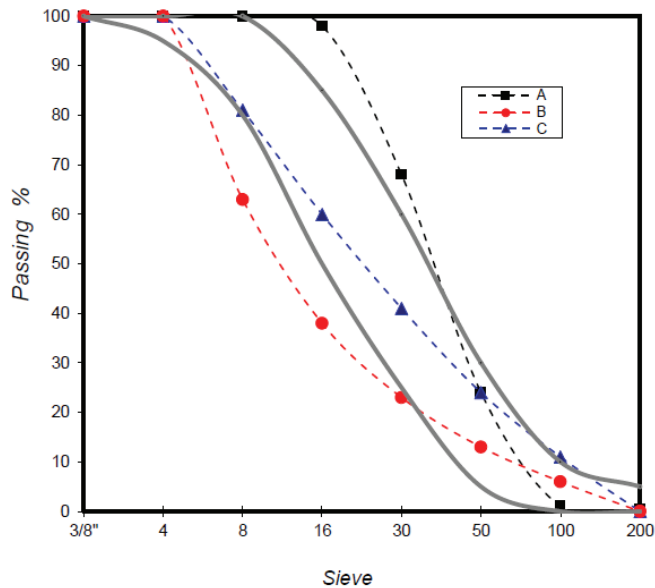


Figure 2. Size distribution for fine selected aggregates. (A) Ottawa sand, (B) river sand and (C) quarry sand. Continuous curves mark the ideal limits for the distribution of grains.

A fineness module (F) for each sample was obtained from the retained percentages accumulated in the sieves number 4, 8, 16, 30, 50 and 100. The fineness module of a sand is defined as the sum of percentages of the material retained in the sieves number 4, 8, 16, 30, 50 and 100 divided by 100 [19]:

$$F = \frac{\sum_n f_n}{100}, n = 4, 8, 16, 30, 50, 100 \quad (1)$$

in which f_n is the percentage of material retained in sieve number n . The fineness modules of the selected fine aggregates are shown in Table 1.

Table 1. Modules of fineness of the sands (A, B, C).

Sand	F
A	2.10
B	3.57
C	2.83

Relative densities and absorptions of the selected fine aggregates were measured according to norm ASTM C128-15 [20]; the results are displayed in Table 2.

Table 2. Relative densities and absorption percentages of the sands (A, B, C).

Sand	Relative densities	Absorption of sand / %
A	2.650	0.02
B	2.535	3.46
C	2.006	7.76

Porosity and nitrogen adsorption

Measurements of nitrogen adsorption were performed on a vacuum line. Helium served to calibrate the volume of the equipment. The specific BET surface was obtained on adjusting the experimental data according to the model of Brunauer, Emmet and Teller (BET) [21],

$$n_{ads} = \frac{n_{mono} \cdot C \cdot \frac{p}{p_0}}{\left(1 - \frac{p}{p_0}\right) \cdot \left(1 + (C - 1) \cdot \frac{p}{p_0}\right)} \quad (2)$$

in which n_{ads} is the specific amount of nitrogen adsorbed in the adsorbent (in moles per unit of adsorbent mass) at the relative pressure p/p_0 (p_0 is atmospheric pressure or saturation pressure); C is a parameter related to the adsorption and vaporization enthalpies of nitrogen, and n_{mono} is the specific amount of nitrogen that conforms to a monolayer in the adsorbent (assessed material). The latter parameter allows to calculate the specific BET surface of the materials as $S_{BET} = n_{mono} N_A A_{N_2}$; N_A is Avogadro constant; and A_{N_2} is the cross-sectional area of a dinitrogen molecule ($A_{N_2} = 0.162 \text{ nm}^2$). The data analyzed with regression were selected to be in the range of relative pressures between 0.02 and 0.25.

The total porosity of the fine aggregates was estimated from the total amount of nitrogen adsorbed at relative pressure 0.95. At this pressure, we considered that almost all pores (from micropores to macropores) were filled with nitrogen. Adsorbed nitrogen is found in a liquid state (due to capillary condensation); the volume of total porosity is calculated as $n_{\text{ads}}(\rho/\rho_0 = 0.95) M_{\text{N}_2} / \rho_{\text{N}_2(\text{liq})}$, in which $M_{\text{N}_2} = 28.0 \text{ g mol}^{-1}$, and $\rho_{\text{N}_2(\text{liq})} = 0.808 \text{ g cm}^{-3}$.

Formulation and molding of concrete samples

Six specimens were formulated and cast. Samples in blank groups with no added hydrophobic silica particle, labeled A0, B0 and C0, were prepared with fine aggregates Ottawa sand-A, river sand-B and quarry sand-C, respectively. Samples in a second group, labeled A1, B1 and C1, were prepared with sands A, B and C, respectively and with added hydrophobic silica particles.

Each sample was formulated with Portland cement Type I, distilled water and fine aggregates A, B or C. Samples A0, B0 and C0 contained no hydrophobic silica particle, whereas samples A1, B1 and C1 were formulated with them. Table 3 summarizes these preparations.

Table 3. Preparation of samples; each proportion is relative to the mass of Portland cement.

Sample label	(Mass of component) / (Mass of cement)					
	A0	B0	C0	A1	B1	C1
Hydrophobic silica particles	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04
Portland cement	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fine aggregate	2.73	2.73	2.73	2.69	2.69	2.69
Water	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49

Each preparation was stirred with a paddle mixer and cast into cubic molds (Teflon®) of side 25 mm (adaptation of the norms ASTM C109/C109M-16a). [22]

The anti-adherent molds allowed the formation of cubic samples of concrete matrices free of demolding substances that might affect the materials for surface, water absorption and drying evaluations [23]. Once molded, the samples were allowed to harden in the molds. After 24 h, the samples were removed from the containers and cured on immersion in water for 28 days. The specimens were then dried under environmental conditions (25 ° C, relative humidity 60 %) for seven days.

Contact angles

The contact angle with water was measured on placing a sessile water drop (10 µL) on a clean and regular surface of each sample. Digital photographs of the drops were processed and analyzed (DropAnalysis, software ImageJ). [24]

Water absorption

The rate of water absorption by a cured and dry sample was measured on submerging each cube in an exact volume of water in an hermetic container. At defined time lapses, the water in contact with the specimens was poured into a graduated cylinder to measure the non-absorbed volume of water. The relative absorption parameter A is defined as:

$$A = \frac{\rho_w \cdot V_{\text{abs}}(t)}{m} \quad (3)$$

in which ρ_w is density of water ($\rho_w = 1.00 \text{ g/mL}$) at temperature $25 \text{ }^\circ\text{C}$, V_{abs} is volume of water absorbed at time t and m is mass of the dry sample used in the experiment.

Drying kinetics

The concrete material samples (cubes of side 25 mm) were immersed in water for 28 days for curing. Upon completion of this period, the cubes were completely saturated with water. The drying of the samples was gravimetrically measured at $25 \text{ }^\circ\text{C}$ in an environment with relative humidity 60% for 72 h.

Results

Porosity of fine aggregate

Figure 3 shows isotherms of nitrogen adsorption (at $-196 \text{ }^\circ\text{C}$) of the studied sands. The order in the porosity and the specific BET surface of the fine aggregates is $A < B \ll C$. This trend of porosity conforms to that of the water absorption of the sands and the source of each fine aggregate. The capacity of a fine aggregates to absorb water is related to the accessible internal volume of the materials (their porosity). The porosity and the specific BET area of A (Ottawa) was practically imperceptible, in accordance with its great crystallinity.

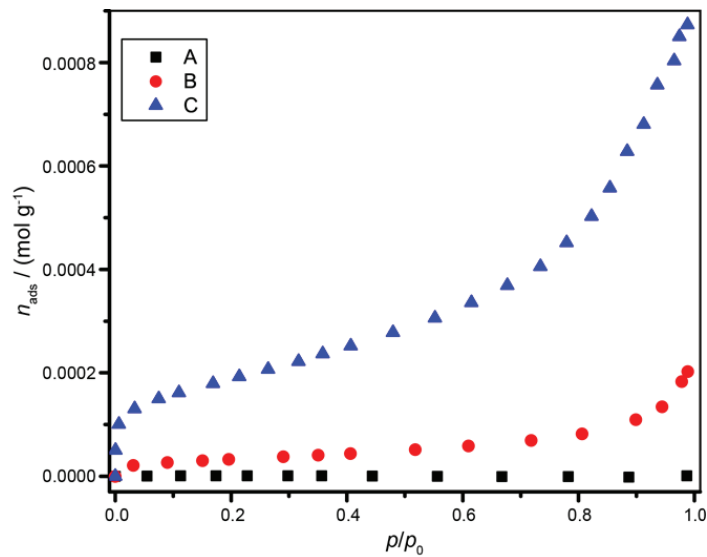


Figure 3. Nitrogen isotherms at temperature $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ of fine aggregates A (Ottawa), B (river) and C (quarry).

The specific BET surfaces and the resulting porosities are presented in Table 4.

Table 4. Specific BET surfaces and porosities of A (Ottawa), B (river) and C (quarry).

Sample	Total specific porosity / $\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$	BET / $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$
A	0.000	0.10
B	0.005	2.72
C	0.027	15.0

A linearized version of the BET isotherm was used such that data point $\frac{x}{n_{ads}(1-x)}$ was adjusted to a linear model based on relative pressure $x = p/p_0$. For fits with this linearized version, the intervals of relative pressures were selected according to a criterion that the data of $n_{ads}(p_0 - p)$, depending on p/p_0 , must have an increasing tendency. [25]

Surface properties of concrete matrices

Hydraulic concrete is an intrinsically hydrophilic composite material according to its chemical composition and morphological traits. Its components, which are highly polar inorganic substances, arise upon hydration of several calcium silicates [8,12,13]. The resulting hydrated substances crystallize and embed other hydrophilic materials such as sand. Water-contact angles of the samples formulated without hydrophobic particles (A0, B0, C0) showed the hydrophilic character of all samples (small angles, of order 35°, Table 5). This hydrophilic character of the samples decreased with the functionalization of the concrete matrices with hydrophobic silica particles (samples A1, B1, C1), with the advantage that this functionalization of the matrices was performed with a small proportion of hydrophobic particles (mass proportion particles/cement = 0.04). All matrices formulated with hydrophobic particles showed similar contact angles, about 95 °, regardless of the type of fine aggregate (porosity and granulometry).

Table 5. Contact angles of sessile water droplets placed on material surfaces of concrete matrices formulated; Each uncertainty is a standard deviation of six values of contact angles (left and right angles of three independent drops)

Sample	Contact angle / deg
A0	39 ± 5
B0	36 ± 4
C0	29 ± 6
A1	101±4
B1	95 ± 5
C1	92 ± 5

Dynamics of water absorption

For each cube sample (25 mm), the quantity of water absorbed for varied duration t was measured. The mass of water measured was normalized with the initial mass of the dry sample (Equation 3). The cubic samples were saturated on immersion in water for 72 h. In addition, there were dynamic aspects that were considered after numerical simulation of the experimental absorption data with respect to time, for example, the specific rate of first- order water diffusion k and the maximum achievable specific absorption at infinite time A_∞ .

Dynamic specific absorption as a function of time was based on the Kibler-Carter model [18,26],

$$A(t) = A_\infty \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{r_1 e^{-r_2 t} - r_2 e^{-r_1 t}}{(2j+1)(r_1 - r_2)} + \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{k\beta}{\gamma + \beta} \right) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{e^{-r_2 t} - e^{-r_1 t}}{r_1 - r_2} \right\} \quad (4)$$

in which

$$r_1 = \frac{1}{2} \left[\{(2j + 1)^2 k + \gamma + \beta\} + \sqrt{\{(2j + 1)^2 k + \gamma + \beta\}^2 - 4k\beta(2j + 1)^2} \right],$$

$$r_2 = \frac{1}{2} \left[\{(2j + 1)^2 k + \gamma + \beta\} - \sqrt{\{(2j + 1)^2 k + \gamma + \beta\}^2 - 4k\beta(2j + 1)^2} \right].$$

According to this model, the water diffuses inside a material at specific rate k . During this diffusion through the material, the interior water molecules might be free or bound. Parameter γ represents the specific rate of water interconversion from free to bound; β represents the specific rate of water from bound to free.

For concrete matrices, the hydrophilic character of the calcium silicate matrix governs the water absorption. This hydrophilic condition is, however, intrinsic to the matrices and can become modified when formulating specimens with hydrophobic particles [18]. The selection of aggregates to formulate a concrete material affects its final water-transport properties. For example, fine aggregate C had the larger porosity among the assessed fine aggregates and showed great water absorption, but an ideal grain size distribution. In contrast, aggregate B presented intermediate porosity and absorption with a deficient granulometric curve.

Absorption of conventional hydraulic concrete materials is known to depend on the fraction water / cement. An effective granulometry of a sand containing grains of varied size is desirable to fill the spaces completely.

Figure 4 shows the experimental data of specific water absorption of the six samples of concrete matrices evaluated as a function of time.

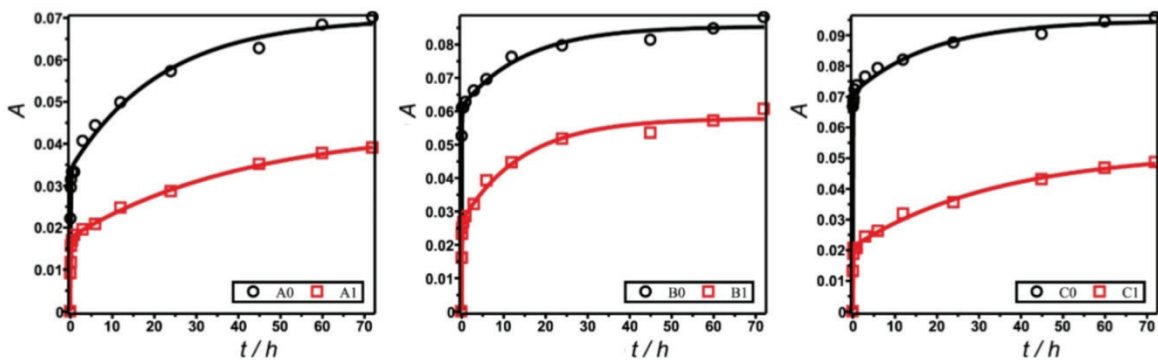


Figure 4. Dynamics of water absorption of the concrete materials samples prepared with sands A, B, C. Continuous lines represent models of experimental data (squares and circles) fitted with equation 4. (a) Samples in a group prepared with fine aggregates of small water absorption (A0, A1). (b) Samples in a group prepared with fine aggregates of intermediate water absorption (B0, B1). (c) Samples in a group prepared with fine aggregates of large water absorption (C0, C1)

Continuous curves represent the modeling function of Equation 4, obtained on non-linear fit with the algorithm of Levenberg and Marquart. Summations of equation 4 were restricted to 100 terms each to accelerate the calculations.

The adjusted parameters appear in Table 6. All modelled curves show concordance with the trend of the experimental data, as confirmed with small values of standard error S of regressions in Table 6. Parameter S indicates the maximum error achievable in predicting specific water absorption A performed with the models.

Regarding the applications of concrete matrices, two important parameters in Equation 4 of the model are relative absorption maximum A_{∞} and specific rate k of water absorption. As expected, all samples formulated with non-hydrophobic particles (A0, B0, C0) showed larger values of maximum specific water absorption A_{∞} . Among these hydrophilic materials (without hydrophobic particle), a comparison of specific absorption rates k shows that the absorption capacity of the fine aggregates influenced the specific rate of absorption of the formulated concrete materials. This specific rate k of water absorption increased with the capacity of the fine aggregates (A < B < C) to absorb water. In contrast, k decreased with the hydrophobization of the matrix for each fine aggregate.

An addition of hydrophobic particles to materials clearly decreased the maximum specific absorption A_{∞} . The trend of the absorption capacity of the fine aggregates (A < B < C) was maintained for the maximum specific absorption (A_{∞} : A1 < B1 < C1). This finding indicates that, despite the hydrophobicity induced by the modified silica particles, the affinity of the fine aggregates for water maintained its effect.

Table 6. Fitted parameters of Equation 4 obtained on modeling experimental water absorption data of concrete samples; S represents the standard error of the regressions

Sample	A_{∞}	k / h^{-1}	β / h^{-1}	γ / h^{-1}	S
A0	0.070 ± 0.002	8 ± 1	0.046 ± 0.007	0.048 ± 0.008	0.0017
A1	0.044 ± 0.002	5.3 ± 0.6	0.024 ± 0.004	0.035 ± 0.005	0.00071
B0	0.085 ± 0.001	17 ± 2	0.066 ± 0.01	0.026 ± 0.005	0.0016
B1	0.058 ± 0.001	8 ± 1	0.07 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.0016
C0	0.095 ± 0.002	24 ± 4	0.05 ± 0.01	0.017 ± 0.004	0.0018
C1	0.052 ± 0.002	9 ± 1	0.029 ± 0.005	0.042 ± 0.006	0.0010

These results of water absorption reflect an effect of the integral modification of concrete materials with hydrophobic particles. The hydrophobic silica particles relevantly adjusted the water absorption of the concrete materials regardless of the fine aggregates chosen for the formulations.

The process reverse of water absorption is drying. Drying dynamics (or drying kinetics) also help to evaluate the water-transport traits of assessed materials. The main parameter obtained from the experiments on drying kinetics is the specific drying rate.

In the experiments on drying dynamics, the mass of the initially water-saturated samples was recorded as a function of time t . Drying was conducted at constant temperature 25 °C and relative humidity 60 %. Under these conditions, the total amount of water contained in the samples did not evaporate, but the drying rate allows one to extract information about the transport of water through the material. Figure 5 shows the drying curves of the six prepared samples; the data were normalized with respect to each initial mass of the wet samples to obtain the relative mass m_r . The relative mass data as a function of time t were fitted with a stretched exponential decay function,

$$m_r = m_{r\infty} + (1 - m_{r\infty})e^{-\sqrt{r}t} \tag{5}$$

in which the initial relative mass of fully water-saturated samples (after curing for 28 days) is 1, $m_{r\infty}$ is the extrapolated relative mass of the sample after evaporation of the water (when equilibrium was attained under the specified ambient conditions) and r is specific drying rate. In general,

a stretched exponential decay has form $e^{-(r t)^\delta}$, in which δ is known as the stretching factor. For the drying dynamics fits in Figure 5, stretching factor 1/2 was used. The fitted parameters of Equation 5 that modeled the data in figure 5 are shown in Table 7.

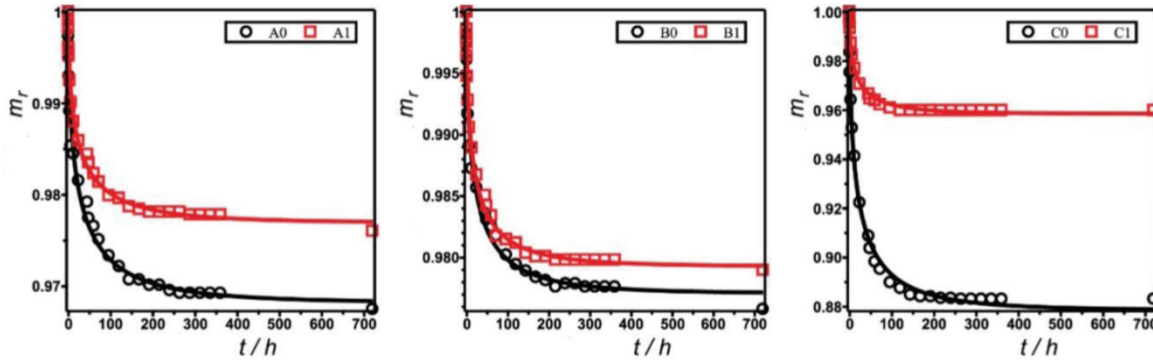


Figure 5. Drying kinetics of samples prepared with (a) fine aggregate A with small water absorption, (b) fine aggregate B with medium water absorption and (c) fine aggregate C with large water absorption. Labels 0 and 1 indicate that the samples were prepared with hydrophilic and hydrophobized concrete matrices, respectively. The solid lines represent fits of experimental data (circles and squares) with the function of Equation 5

Table 7. Fitted parameters of Equation 5 obtained on modelling the experimental data of the drying kinetics of concrete matrix samples prepared with fine aggregates A, B, C embedded in hydrophilic matrices (A0, B0, C0), or embedded in hydrophobized concrete materials (A1, B1, C1); parameter S represents the standard error of the regressions.

Sample	$m_{r\infty}$	r/h^{-1}	S
A0	0.9682 ± 0.0005	0.037 ± 0.004	0.0010
A1	0.9769 ± 0.0003	0.039 ± 0.003	0.00057
B0	0.9771 ± 0.0003	0.045 ± 0.004	0.00070
B1	0.9793 ± 0.0002	0.050 ± 0.003	0.00047
C0	0.878 ± 0.001	0.045 ± 0.003	0.0032
C1	0.9585 ± 0.0005	0.058 ± 0.005	0.0013

These fits are generally satisfactory, as evident from the small values of standard error S of regression. According to those parameters, we inferred that, for materials prepared with fine aggregates, the trend of water affinity of the original aggregates ($A < B < C$) affected the water-release dynamics of the materials. Specific drying rate r decreased according to the inverse trend of water affinity. The decreased hydrophilicity then explained the increased rate of water release upon drying of the materials. This finding is consistent with the trend observed in the adsorption experiments.

Conclusion

The main finding of this work is that the water-transport traits of the fine aggregates used to prepare concrete materials affected the water-transport characteristics of the derived concrete materials. The induced trend of water absorption produced with the fine aggregates was maintained in the final materials. Sands with large water absorption or an unfavorable granulometry distribution produce materials with large water absorption, but the water absorption of concrete matrices decreases on formulating concrete materials with hydrophobic silica particles.

A detailed list of facts verified in the present study follows.

- Contact angles of all modified samples with hydrophobic silica particles exceeded 90°.
- Water absorption was significantly inhibited on the modification of concrete matrices prepared with commercial sands and functionalization with hydrophobic silica particles (decrement more than 30 % of water absorption with respect to the matrices without modification).
- The porosity and granulometry distribution of the commercial sands influenced the water absorption of the concrete matrices.
- The addition of hydrophobic silica particles decreased the water absorption of the derived concrete materials in all cases.

References

- [1] S. Mindess, *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. Kidlington, UK: Elsevier, 2019.
- [2] Y. Ding and X. Ning, *Reinforced Concrete*. Beijing, China: Springer, 2022.
- [3] A. Surahyo. *Concrete Construction*. Cham, Switzerland: Springer, 2019.
- [4] W. Yang, *The Issues and Discussion of Modern Concrete Science*. Berlin, Germany: Springer, 2015.
- [5] K. Janamian and J. Aguiar, *Concrete Materials and Technology*. London, UK: CRC Press, 2023.
- [6] Z. Jiang, *High-Performance Concrete with Manufactured Sand*. Singapore, Singapore: Springer, 2023.
- [7] G. de Schutter and K. Lesage, *Active Rheology Control of Cementitious Materials*. Oxford, UK: CRC Press, 2023.
- [8] G. Gaganelis, P. Mark, P. Forman, *Optimization Aided Design*. Berlin: Germany, Wilhelm Ernst & Sohn, 2022.
- [9] P. Hewlett, M. Liska, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. London, UK: Elsevier, 2019.
- [10] A. Chaubey. *Practical Concrete Mix Design*. CR Press. New York, NY: 2020.
- [11] R. Torrent, R. Neves, K. Imamoto, *Concrete Permeability and Durability Performance*. London, UK: CRC Press, 2022.
- [12] Z. Li, X. Zhou, H. Ma, D. Hou, *Advanced Concrete Technology*. Hoboken, NJ: Wiley, 2023.
- [13] S. Kosmatka, M. Wilson, *Design and Control of Concrete Mixtures*. Skokie, IL: PCA, 2016.
- [14] A. Moulay-Alia, M. Abdeldjalila M., H. Khelafib, "An experimental study on the optimal compositions of ordinary concrete based on corrected dune sand—Case of granular range of 25 mm. Case Studies in Construction," *Materials*, Vol.14, pp. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00521>.
- [15] M. Gou, B. Hu, F. Xing, X. Zhou, M. Sun, L. Sui, Y. Zhou, "Characterization of mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sand and seawater based on statistical analysis. water absorption in concrete materials by modification with hybrid hydrophobic silica particles," *Construction and Building Materials*, Vol.234, pp. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117339>.
- [16] J. Kaufmann, "Evaluation of the combination of desert sand and calcium sulfoaluminate cement for the production of concrete," *Construction and Building Materials*, Vol.221, pp. 210-218, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118281>.
- [17] Z. Steyn, A. Babufem, H. Fataar, R. Combrinck, "Concrete containing waste glass, plastic and rubber as sand replacement," *Construction and Building Materials*, Vol.269, pp. 1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.121242>.
- [18] E. Mora, G. González, P. Romero, E. Castellón, "Control of water absorption in concrete materials by modification with hybrid hydrophobic silica particles," *Construction and Building Materials*, Vol.221, pp. 210-218, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.086>.
- [19] *ASTM (American Society for Testing and Materials), Standard Specification for Concrete Aggregates ASTM International. West Conshohocken PA, ASTM C33/C33M-18, 2018.*
- [20] *ASTM (American Society for Testing and Materials). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International. West Conshohocken PA, ASTM C128-15, 2015.*

- [21] P. Schneider, "Adsorption isotherms of microporous-mesoporous solids revisited," *Appl. Catal. A: General*, Vol.129, pp. 157–165, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0926-860X\(95\)00110-7](https://doi.org/10.1016/0926-860X(95)00110-7).
- [22] ASTM (American Society for Testing and Materials). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM International. West Conshohocken PA, ASTM C109/C109M-16a, 2020.
- [23] E. Mora, F. Castellón, "Anti-adherent molds yield hydraulic concrete samples suitable for assessments of surface and water absorption," *Journal of Civil Engineering and Construction*, Vol.10 N°4, pp. 245-252, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32732/jcec.2021.10.4.245>.
- [24] A. Stalder, G. Kulik, D. Sage, L. Barbieri, P. Hoffmann, "A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles," *Colloid, Surface*, Vol. 286, pp.92–103, 2006. DOI:10.1016/j.colsurfa.2006.03.008.
- [25] K. Walton and R. Snurr, "Applicability of BET Method for Determining Surface Areas of Microporous Metal-Organic Frameworks," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 129, N°27, pp. 852–856. 2007. DOI:<https://doi.org/10.1021/ja071174k>.
- [26] H. Kibler, K. Carter. "Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins". *Journal Composite Materials* Vol. 12 N° 118, pp. 118-131. 1978. DOI:<https://doi.org/10.1177/002199837801200201>.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.