



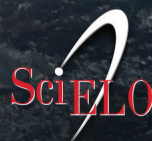
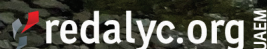
TECNOLOGÍA *en marcha*

Revista trimestral
Abril- Junio 2023
Volumen 36-2
ISSN-E 2215-3241



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos



Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica de Costa Rica

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

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

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

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Ariana Sanabria García

Imagen de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 36-2. Abril-Junio, 2023
- 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

Comparación de la actividad antifúngica de los aceites esenciales del género <i>Cinnamomum spp.</i> contra fitopatógenos Comparison of antifungal activity against plant pathogens using essential oils of <i>Cinnamomum spp</i> gender <i>Angie Geraldine Rojas-Amado, Jovanna Acero-Godoy</i>	3
Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestal con Palma Africana (<i>Elaeis guineensis Jacq.</i>) Evaluation of soil fertility in agroforestry systems with African Palm (<i>Elaeis guineensis Jacq.</i>) <i>Parménides Furcal-Beriguete, Zeydi Robles-Argüello, Ricardo Salazar-Díaz</i>	20
Primer informe sobre presencia de yemas cotiledonares en plántulas de tacaco [<i>Sechium tacaco</i> (Pittier) C. Jeffrey] First report on presence of cotyledonous buds in tacaco [<i>Sechium tacaco</i> (Pittier) C. Jeffrey] seedlings <i>José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	32
Análisis hidrológico e hidrodinámico del Monumento Nacional Guayabo y su impacto frente al cambio climático Hydrological and hydrodynamic analysis of the Guayabo National Monument and its impact due to climate change <i>Daphne María Zamora-Varela, David Borge-Leandro</i>	37
Simulación del sistema de interconexión eléctrica de los países de América Central usando ETAP Simulation of the Central American interconnected electrical system using ETAP <i>Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez, Gonzalo Mora-Jiménez, Carlos Meza</i>	50
Efecto de la morosidad sobre la rentabilidad en una Institución microfinanciera de Costa Rica: Propuesta de un modelo financiero Effect of default on profitability in a Costa Rican microfinance institution: Financial model proposal <i>David Barboza-Navarro, Johanna Solórzano-Thompson, Javier Paniagua-Molina</i>	59
Condición nutricional de cultivos en sistemas de producción agroforestal con Palma Africana (<i>Elaeis guineensis Jacq.</i>) Nutritional status of crops in agroforestry production systems with African Palm (<i>Elaeis guineensis Jacq.</i>) <i>Parménides Furcal-Beriguete, Zeydi Robles-Argüello, Ricardo Salazar-Díaz</i>	75

An evaluation of Kd-Trees vs Bounding Volume Hierarchy (BVH) acceleration structures in modern CPU architectures	
Evaluación de estructuras de aceleración Kd-Trees vs BVH en arquitecturas CPU modernas	
<i>Ernesto Rivera-Alvarado, Julio Zamora-Madrigal.....</i>	<i>86</i>
Mechanical properties of polycaprolactone microfilaments for muscular tissue engineering	
Propiedades mecánicas de microfilamentos de policaprolactona para ser usados en ingeniería de tejidos	
<i>Laura Rojas-Rojas, Teodolito Guillén-Girón</i>	<i>99</i>
Biomarcadores en el diagnóstico temprano y tratamiento de cáncer	
Biomarkers in the early diagnosis and treatment of cancer	
<i>Melissa Camacho-Sánchez, Luis Alfredo Leandro-Vargas, Montserrat Mendoza-Salas, Natalie Meza-Gutiérrez, Fabricio Montero-Zúñiga.....</i>	<i>109</i>
Análisis de la situación actual de residuos marinos en Costa Rica	
Marine litter present situation in Costa Rica	
<i>Lilliana Abarca-Guerrero, Andrea Acuña-Piedra, María Angélica Astorga-Pérez, Karol Ulate-Naranjo, Susy Lobo-Ugalde, Victoria Rudin-Vega</i>	<i>118</i>
Coagulación de aguas residuales mediante una mezcla de polvo de <i>Crotalaria longirostrata</i> y sulfato de aluminio	
Coagulation of wastewater using a mixture of <i>Crotalaria longirostrata</i> powder and aluminum sulfate	
<i>Alicia Pastrana-Pacho, Rudy Solís-Silvan, Israel Ávila-Lázaro, José Ramón Laines-Canepa, Baltazar Sánchez-Díaz</i>	<i>135</i>
Evaluación de la variación en la concentración de aldehídos en agua de lluvia y aire: caso de estudio en un área de conservación de Costa Rica	
Quantitative assessment of aldehydes in air and rainwater: a case study in natural conservation area of Costa Rica	
<i>Melissa Araya-Araya, José Pablo Sibaja-Brenes, Roy Soto-Fallas, José Carlos Mora-Barrantes, Rosa Alfaro-Solís, Henry Borbón-Alpizar, Juan Valdés-González.....</i>	<i>143</i>
Control de flujo de detritos por medio de barreras dinámicas en el trópico, como medio de adaptación al cambio climático, cantón central de Aserrí, quebrada Burío	
Control of debris flow through dynamic barriers in the tropic, as a means of adaptation to climate change, Burío stream in Aserrí	
<i>David Borge-Leandro, Alejandro Antonio Morera-Delgado.....</i>	<i>155</i>

Comparación de la actividad antifúngica de los aceites esenciales del género *Cinnamomum spp.* contra fitopatógenos



Comparison of antifungal activity against plant pathogens using essential oils of *Cinnamomum spp* gender

Angie Geraldine Rojas-Amado¹, Jovanna Acero-Godoy²

Fecha de recepción: 2 de noviembre, 2021
Fecha de aprobación: 6 de marzo, 2022

Rojas-Amado, A. G; Acero-Godoy, J. Comparación de la actividad antifúngica de los aceites esenciales del género *cinnamomum spp.* contra fitopatógenos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 3-19.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5854>

- 1 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud. Colombia. Correo electrónico: agrojas@unicolmayor.edu.co
 <https://orcid.org/0000-0002-3686-5896>
- 2 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud. Colombia. Correo electrónico: jacerog@unicolmayor.edu.co
 <https://orcid.org/0000-0003-1656-6888>

Palabras clave

Biocontrol; salubridad; técnicas; composición; alcanfor.

Resumen

La propagación de plagas afecta diferentes especies de plantas generando un desafío para el mantenimiento del control de la inocuidad alimentaria, diferentes investigaciones concuerdan con que el uso permanente de plaguicidas químicos genera a largo plazo afecciones de salud en las diferentes comunidades bióticas y abióticas, además ocasiona resistencia en los diferentes fitopatógenos a los componentes químicos que contienen los plaguicidas, lo cual promueve la proliferación de dichos microorganismos. En la búsqueda de soluciones a esta problemática, se han desarrollado varias investigaciones, de las cuales un amplio y prometedor campo es el uso de aceites esenciales (AE) de diferentes plantas, dichas investigaciones han mostrado resultados positivos en la inhibición de la actividad antifúngica. El presente artículo de revisión se realiza con el fin de comparar el efecto inhibitorio que presentan tres aceites del género *Cinnamomum spp.*, *Cinnamomum zeylanicum*, *Cinnamomum cassia* y *Cinnamomum camphora* frente a tres hongos fitopatógenos, *Alternaria solani*, *Fusarium oxysporum* y *Rhizoctonia solani* distribuidos en el suelo a nivel mundial, analizando cual es el método de extracción y el método de caracterización química usado más frecuente, adicionalmente se comparan los resultados obtenidos por distintos autores en cuanto la actividad inhibitoria que estos AE tienen en los fitopatógenos mencionados a diferentes CMI obteniendo conclusiones variables. *Cinnamomum zeylanicum*, parece ser hasta ahora el aceite esencial más estudiado frente a tres especies de hongos mencionadas y presenta un prometedor antifúngico para las nuevas tecnologías de control de plagas, se propone continuar investigando en el comportamiento inhibitorio del aceite de canela.

Keywords

Biocontrol; sanitation; techniques; composition; camphor.

Abstract

The spread of pests affects different plant species generating a challenge for maintaining food safety control, different investigations agree that the permanent use of chemical pesticides generates long-term health conditions in the different biotic and abiotic communities, as well as causing resistance in the different phytopathogens to the chemical components that pesticides contain, which promotes the proliferation of these microorganisms. In the search for solutions to this problem, several investigations have been developed, of which a wide and promising field is the use of essential oils (EA) from different plants, these investigations have shown positive results in the inhibition of antifungal activity. This review article is carried out in order to compare the inhibitory effect of three oils of the genus *Cinnamomum spp.*, *Cinnamomum zeylanicum*, *Cinnamomum cassia* and *Cinnamomum camphora* against three phytopathogenic fungi, *Alternaria solani*, *Fusarium oxysporum* and *Rhizoctonia solani* distributed in the soil worldwide, analyzing which is the extraction method and the most frequently used chemical characterization method, additionally the results obtained by different authors are compared regarding the inhibitory activity that these EA have in the mentioned phytopathogens at different MICs obtaining variable conclusions. *Cinnamomum zeylanicum*, seems to be the most studied essential oil against three species of fungi mentioned so far and presents a promising antifungal for new pest control technologies, it is proposed to continue investigating the inhibitory behavior of cinnamon oil.

Introducción

Desde los comienzos de la humanidad surge el apuro de controlar las plagas que afectan la agricultura creando diferentes tipos de sustancias para combatirlas, sin embargo, a lo largo del tiempo, algunos plaguicidas se han identificado como un peligro para el medio ambiente, amenazando la estabilidad de las comunidades bióticas y abióticas representando a su vez un problema de salud pública. [1]

Durante las últimas décadas, los aceites esenciales (AE) han adquirido un interés creciente gracias a sus características fisicoquímicas ya que no generan residuos nocivos al ser de fuente natural, siendo postulados como control biológico en lugar de los plaguicidas de síntesis química. Debido a sus compuestos esencialmente terpénicos, terpenoides, constituyentes aromáticos, alifáticos, óxidos, alcoholes, éteres, esteroides, aldehídos y cetonas, son antioxidantes, insecticidas y antimicrobianos. [2] [3] [4].

Los AE son mezclas de compuestos líquidas complejas, oleosas y aromáticas naturales, biosintetizados por plantas como metabolitos secundarios en sus flores, brotes, tallos, semillas, raíces, frutos, corteza y madera, son característicos por su bajo peso molecular, por su densidad y naturaleza hidrófoba, al ser compuestos lipófilos, les permite ser inmiscibles en agua y solubles en disolventes orgánicos. Los AE representan menos del 5% del total de la materia seca de la planta, y su acción es rápida pero poco persistente al ser altamente volátiles, representando un problema al momento de su utilización. La actividad antimicrobiana de estos no está determinada solo por uno de sus compuestos si no por la combinación de todos ellos, esta puede ser caracterizada también por su pH ácido. [2][4].

El género *Cinnamomum* cuenta con alrededor de 250 especies de árboles y arbustos que se encuentran distribuidos en el sureste de Asia, China y Australia. Este se cultiva preferiblemente en climas cálidos, generalmente asociados a bosques y selvas tropicales. Los AE frecuentemente usados a nivel mundial son los de *Cinnamomum zeylanicum*, *Cinnamomum cassia* y *Cinnamomum camphora*. Estos pueden contener un alto porcentaje de cinamaldehído y cantidades considerables de eugenol, lo cual depende del origen geográfico de la especie y las condiciones de procesamiento. [2] [5]

La palabra canela, procede de una terminología griega que denota madera dulce, esta se obtiene de la corteza de diferentes especies de las plantas de *Cinnamomum*, derivando de ahí su nombre en inglés cinnamon. La canela es usada en diferentes partes del mundo desde tiempos muy antiguos por sus diferentes propiedades y compuestos bioactivos estudiados en diferentes áreas de la biología. [6] [7]

Actualmente, se ha evaluado la efectividad de los AE de canela en diferentes aspectos medicinales; el AE de la corteza de dicha planta es afrodisíaco, antihelmíntico y tónico. Es útil en el tratamiento de la bilis, sequedad de boca, diabetes, bronquitis, diarrea, picazón y enfermedades cardíacas y urinarias; también es carminativo y expectorante, y es útil en hidrocele, dolor de cabeza, anticancerígeno, etc. En cuanto la industria alimentaria se ha evaluado su efectividad en el control de calidad y producción agrícola mostrando resultados eficientes. [2][5]

No solamente se ha evaluado la actividad antimicrobiana del aceite esencial *Cinnamomum* (canela), sino que en diferentes estudios se ha evidenciado su actividad antioxidante, en donde han comparado con varios AE naturales la eliminación de radicales libres DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), determinando la extinción del radical más fuerte siendo esto confirmado por ensayos de fotoquimioluminiscencia. En estos estudios también se pudo determinar que el eugenol, es el principal compuesto de este aceite y le brinda la capacidad de poseer mayor actividad antioxidante. [5]

En cuanto su actividad antifúngica y antibacteriana, diferentes autores, han determinado que esto se atribuye al compuesto cinamaldehído, siendo un compuesto principal del aceite de canela. Además, el conjunto de los compuestos del aceite como son los oxigenados tales como linalol, 1,8-cineol, neral y geranial, potencializan la actividad antibacteriana. [2][5]

Existe una amplia variedad de hongos fitopatógenos los cuales infectan diferentes cultivos generando daños en el rendimiento de este, por su rápida capacidad de reproducción, ocasionando enfermedades típicas que incluyen la pudrición de raíces y agotamiento. Estos patógenos son generalmente transmitidos a través del suelo. [8] [9]

Uno de los fitopatógenos necrotróficos comúnmente encontrados afectando a las plantas de tomate y papa, es *Alternaria solani* (ver figura 1), este microorganismo causa el tizón temprano, produce diferentes polipéptidos como la solanapirona y el ácido alternárico que le permiten propagarse ocasionando aproximadamente un 50% de pérdidas en el rendimiento de los cultivos, lo cual requiere un control mediante el uso de funguicidas que actualmente, ya han generado resistencia hacia *Alternaria solani*. Otra de las problemáticas es que este fitopatógeno está ampliamente distribuido por el mundo siendo devastador para los cultivos. [10][11][12]

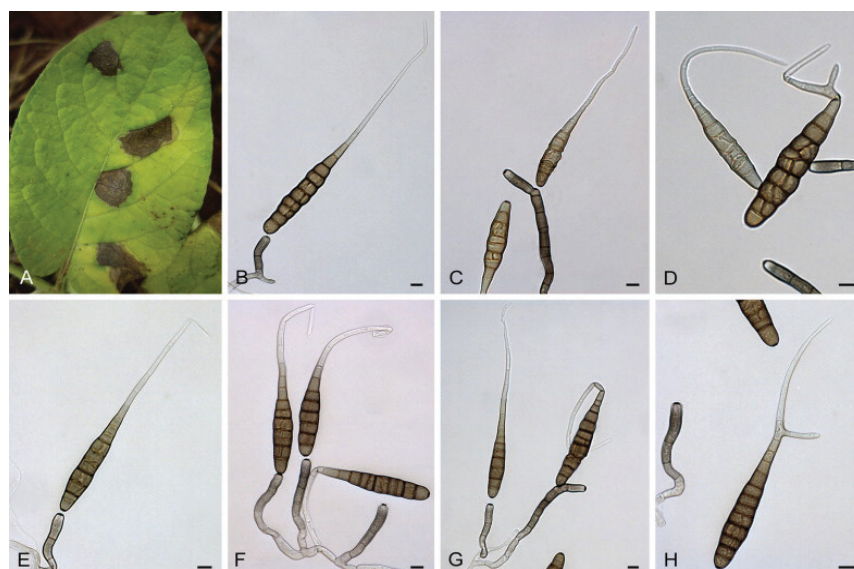


Figura 1. *Alternaria solani*, A. Síntomas de la enfermedad en *Solanum tuberosum* (Foto JE van der Waals, Universidad de Pretoria, Sudáfrica). B - H. Conidios y conidióforos. tomada de:[13]

Por otro lado, *Fusarium oxysporum* (figura 2) es un hongo ampliamente distribuido en suelo y abarca un complejo variable de cepas con características morfológicas y patológicas diferentes, algunas de estas cepas son saprótrofos y endófitos comensales que colonizan la raíces, pero no representan una amenaza para la planta, es más, cepas específicas pueden generar un beneficio para el huésped ocasionando protección ante diferentes patógenos que la pueden afectar, sin embargo, *Fusarium oxysporum* también presenta un complejo de cepas que permiten categorizarlo como hongo emergente, ya que invaden diferentes tipos de plantas distribuidas en el mundo ocasionando síntomas característicos como clorosis en las hojas, necrosis de los sistemas vasculares o muerte del huésped ya que este coloniza el xilema. [14] [15]

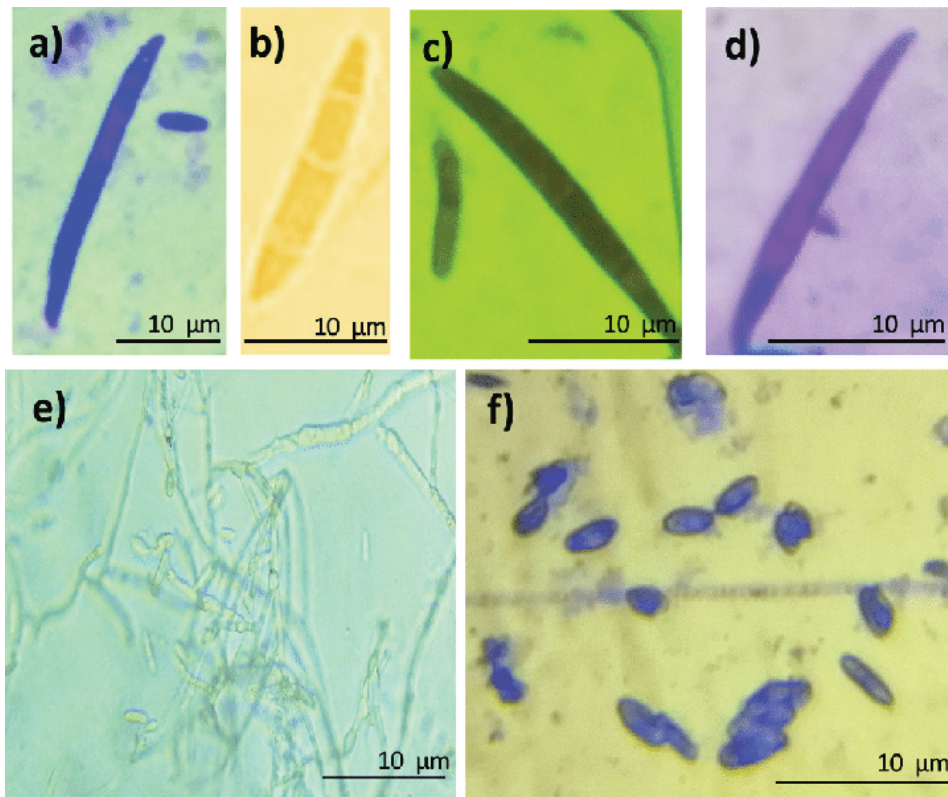


Figura 2. *Fusarium oxysporum*, Estructuras morfológicas de *Fusarium oxysporum* en aumento inmersión (100x); a-d) micrónidios, e) micelio, f) clamidosporas, Tomada de: [16]

Además de los patógenos anteriormente mencionados, otro de los principales hongos necrotróficos con distribución global es *Rhizoctonia solani* (figura 3), siendo responsable de grandes pérdidas en la agricultura a nivel mundial de papa y arroz, causando pudrición en las raíces de la planta colonizada, este hongo tiene la capacidad de sobrevivir en diferentes condiciones ambientales. [17][18] [19]

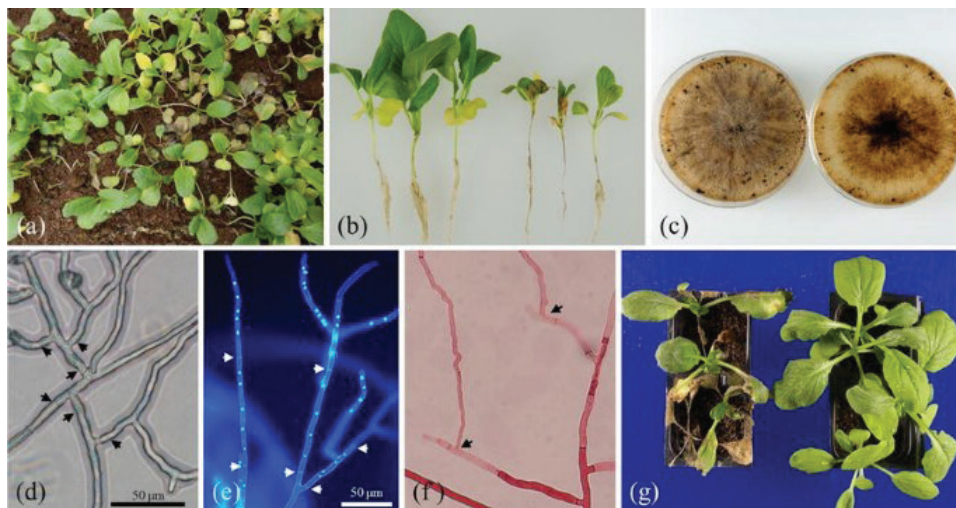


Figura 3. *Rhizoctonia solani*, Síntomas en hojas de nabo y morfología de hongos causales. a Plántulas enfermas en un campo. b Plántulas enfermas con tallo anillado (cv. Pino Green). c Colonias cultivadas en PDA a 25 ° C en la oscuridad durante 2 meses. d Hifas ramificadas e Micrografía de fluorescencia de hifa teñida con DAPI f Anastomosis hifal g Síntomas en las hojas de nabo 8 días después de la inoculación con el aislado RT2 tomada de: [20]

Metodología

Revisión bibliográfica de distintas bases de datos tales como ScienceDirect, NCBI y Scopus, con objeto de proponer el uso de los aceites esenciales, como son el de canela, partiendo de sus beneficios y correlacionándolo con la necesidad de minimizar el empleo de químicos tóxicos para las plagas en el área agrícola. Se propone realizar una comparación de 3 especies del género *Cinnamomun spp.* para la inhibición de fitopatógenos de 3 especies microbianas de origen fúngico, evaluando la efectividad que estos puedan tener a una concentración mínima inhibitoria (CMI) y la composición química de cada uno de estos mediante una revisión bibliográfica de diferentes estudios expuestos en artículos científicos. [21]

Clasificación taxonómica de la canela

La canela, desde los tiempos más antiguos es conocida como una planta aromática, destacándose por ser una de las especias más importantes en el mundo. Pertenece al reino Plantae, a la División Magnoliophyta, a la Clase Magnoliopsida, Subclase Magnoliidae, al Orden, a la Familia Lauraceae, al género *Cinnamomun*, y las 3 especies que se revisaran son *Cinnamomum zeylanicum*, *Cinnamomum cassia* y *Cinnamomum camphora*. [22][23]

Descripción botánica

Cinnamomum zeylanicum

Llamado comúnmente el árbol de canelo, se caracteriza por tener una altura de 5.0 a 10 metros, ramificado, de hojas opuestas, ovales acuminadas, obtusas o ligeramente agudas, flores sedosas, brillantes, lanceoladas, tiene de 10 a 20 cm de largo por 4.0 a 7.0 cm de ancho, con 3.0 a 5.0 nervaduras visibles que salen de la base, presentan una coloración verde oscura cuando el árbol madura (ver figura 4). Las flores son sedosas con una coloración de blanco a amarillento de aproximadamente 6.0 mm agrupadas en panículas generalmente más largas que las hojas. El fruto es ovoide-agudo, seco, de color café oscuro y mide de 10 a 13 mm. [22][24]



Figura 4. Fotografía de *Cinnamomum zeylanicum* Capturada en el Edificio de Ciencias Nucleares por: [25].

Cinnamomum cassia

Conocido como canela china, este tipo de árbol se caracteriza por su parecido con *C. verum* y del cual se diferencia principalmente por su tamaño, siendo *C. cassia* más grande oscilando entre los 10 metros de alto (ver figura 5). Presenta comportamiento perennifolio, tiene hojas perennes, que están opuestas de un brillante color verde con venas rojizas son alargadas y ovaladas con dimensiones aproximadas entre 10 y 18 cm de largo y 4.0 – 5.0 cm de ancho tiene

una conformación más puntiaguda. Cuenta con corteza papirácea, sus ramas son erguidas y se obtiene una canela que cuenta con una superficie rugosa de la corteza de sus ramas jóvenes con una dimensión mayor que un milímetro y un color que puede ser de tono grisáceo. [26][27]



Figura 5. Fotografía de *Cinnamomum cassia* tomada de [26].

Cinnamomum camphora

Comúnmente llamado alcanfor, es un árbol aromático, de crecimiento relativamente acelerado que puede superar los 30 metros de altura, cuenta con una copa densa redondeada y un tronco grueso de 50 a 100 cm de ancho que tiene una corteza inicialmente lisa, grisácea que tiende a tornarse gruesa rugosa y fisurada a lo largo, este se ramifica generalmente desde muy abajo, presenta ramillas delgadas de color castaño, sus hojas son normalmente alternas y perennes, simples, pecioladas, anchas, de color verde brillante, ovado-elípticas, de 6.0-15 cm de largo por 3.0-7.0 cm de ancho, su base es anchamente cuneada o redondeada, su margen es entero y algo engrosado, a veces algo ondulado (ver figura 6). Sus flores son bisexuales, sobre pedicelos glabros de 1.0-2.0 mm de largo, con una tonalidad blanco-verdosa o amarillenta, ligeramente acampanadas de unos 3.0 mm de largo, con un perianto de 6 tépalos elípticos situados en dos verticilos. Sus frutos son bayas redondas, ovoides o subglobosas, de 7.0 a 10 mm de diámetro de color rojo a negrozco, acompañado de un perianto cupuliforme verdoso. [28], [29]



Figura 6. Fotografía de *Cinnamomum camphora* tomada [29].

Lugar de origen, distribución y cultivo

La canela es endémica de Asia del sur, puntualmente de Sri Lanka, que es una nación insular al sur de la India, siendo este el productor y exportador de aceite de corteza y hojas dominante a nivel mundial. Se han identificado cerca de 250 especies de canela. Las especies que motivan esta revisión bibliográfica son *C. cassia* y *C. camphora*, originarias de China y *C. zeylanicum* es originaria de Sri Lanka, sin embargo, estas son cosmopolitas y se encuentran distribuidas en diferentes partes del mundo. [30]

El crecimiento del árbol de canela es favorecido en un clima húmedo, tropical, cálido de baja altitud y el suelo no debe estar anegado ya que se produciría una corteza de sabor amargo, generalmente está listo para su cosecha después de 3 años, la especia se obtiene secando la parte central de la corteza y el aceite volátil se obtiene de diferentes partes de la planta, vale aclarar que poseen la misma variedad de hidrocarburos en proporciones diferentes con componentes destacados como cinamaldehído en la corteza, eugenol en las hojas y alcanfor en la raíz. Las flores y frutos son una rica fuente de acetato de trans-cinnamilo y se ha encontrado más de 80 compuestos de diferentes partes de la canela. [30]

Métodos de extracción de los aceites

La hidrodestilación se puede emplear de tres formas diferentes: destilación de agua, destilación de agua y vapor y destilación directa de vapor, implicando tres procesos fisicoquímicos principales la hidrodifusión, la hidrólisis y la descomposición por calor [31]. Se puede ver una representación gráfica en la figura 7.

Sin embargo, que este sea el método de mayor uso no quiere decir que no se presente dificultades y desventajas, tales como la pérdida de compuestos volátiles y degradación de compuestos insaturados al requerir un mayor tiempo de extracción, causando una afección en la calidad del aceite y con ello generando una baja eficacia de extracción, para buscar solución a la creciente problemática, en diferentes investigaciones sobre técnicas adicionales innovadoras y ecológicas se han implementado técnicas que reduzcan el tiempo de extracción, generen un menor consumo de energía y disolventes orgánicos y así originando menos residuos y emisiones de CO₂ como la extracción asistida por ultrasonido, la extracción asistida por microondas y la extracción asistida por nitrocelulosa, siendo estas técnicas de excelente aplicación dando unos resultados muy efectivos. [32] [33] [34] [35][36]

Se estima que la canela puede tener entre 20 y 80 compuestos químicos y que estos son muy complejos, la presencia y concentración relativa de estos varía por muchos factores como el área geográfica, la edad de cultivo del árbol, el periodo de cosecha y el suelo de la planta, como se muestra a continuación en el cuadro 1 [32].

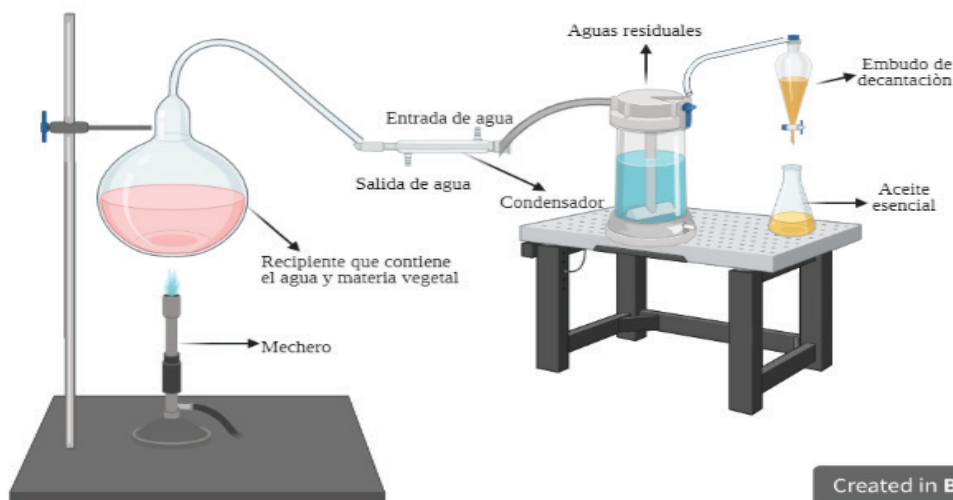


Figura 7. Representación gráfica de la hidrodestilación utilizada por los investigadores, Elaboración propia, referencias revisadas: [36] [37] [38]

Caracterización química del aceite esencial de canela

Así como el método de extracción de aceites más común es la hidrodestilación a pesar de sus dificultades, el método predilecto para la evaluación química cualitativa de componentes es la GC-MS (Cromatografía de gases – espectrometría de masas), esto por su bajo costo de empleo, capacidad de alto rendimiento y alta sensibilidad, la imposición de este método depende de cada equipo, lo cual permite agregar como factor de variación para la presencia de componentes el manejo que el aceite tenga al ingresar al cromatógrafo. Lo anteriormente mencionado se evidencia en el cuadro 2, en la cual se comparan los componentes encontrados por diferentes autores y todos varían en porcentaje y presencia. [39]

En el trabajo realizado por V.S Pragadheesh *et al.*, 2013, se puede referenciar lo anteriormente mencionado, pese a que la extracción y medición de componentes se realizó de manera mensual durante un año, y aunque se tratara de la misma planta de *C. camphora*, hubo meses en los cuales los componentes no estaban presentes o se encontraban en diferente porcentaje, cuestión que los autores le otorgan a las variaciones estacionales, ya que tanto como la recolección, conservación y manejo para la extracción del aceite de la corteza de esta planta se realizó sin ninguna variación, por eso sería incorrecto delimitar el porcentaje o presencia de los diferentes componentes. [40]

En el caso del aceite esencial *C. zeylanicum*, Božik *et al.*, 2017, Kalagatur *et al.*, 2020 y Yasmin *et al.*, 2020, indican haber determinado cantidades relativas de α -pineno, Linalol y Eugenol; En cuanto al aceite esencial *C. cassia*, Jeyaratnam *et al.*, 2016, Xie *et al.*, 2017 y Chen *et al.*, 2020 únicamente concuerdan con haber determinado Cinamaldehído. Y a pesar de que no todos los autores citados para *C. camphora* encuentran una similitud en la búsqueda de compuestos, 3 de 4 si lo hicieron, V.S Pragadheesh *et al.*, 2013, Chen *et al.*, 2020 y Xiao *et al.*, 2020 concuerdan con haber encontrado α -pineno, Canfeno, β -pineno, Borneol, Cariofileno, γ -Elemene, Mirceno, γ -terpineno y Alcanfor, siendo también estas 3 investigaciones las que más relacionan compuestos, esto puede ser por la variación geográfica en la cual se encuentra la

planta, en estos casos estaban situadas en países como República checa, India y Pakistán, además existen condiciones edafoclimáticas y genéticas de la planta que pueden generar que la concentraciones de las componentes sean diferentes. [34] [41][42][43][44][45][46][47][48]

Cuadro 1. Composición química de los AE de canela.

Compuesto químico	Cinnamomum zeylanicum (%)			Cinnamomum cassia (%)			Cinnamomum camphora (%)			
	[41]	[42]	[43]	[44]	[45]	[34]	[40]	[47]	[46]	[48]
Acetato de cinamilo				2,50%						
Cumarina				1.0%	11.98%			7.45%		
α-pineno	1.04%	0,60%	0.141%				3.7%	4.85%	2.2%	
Canfeno	0.33%	0,19%					2.2%	4.43%	0.5%	
β-pineno	0.21%	0,44%					1.4%	3.57%	0.7%	
α-felandreno	0.80%	5,92%					0.7%		5.7%	
p-cimeno	1.22%	1,21%					0.5%	3.16%		
d-limoneno	0,71%		12%							
Eucaliptol	0.12%			0.2%					16.8%	
Linalol	1.87%	4,29%	0.171%	1.0%				0.46%	26.6%	98.39%
Borneol				0.5%			0.4%	16.41%	0.7%	
Naftaleno				0.1%					3.1%	
Oxido de linalol								1.53%		0,84%
α-terpineol	0.24%			0.7%			0.8%		8.7%	
Cinamaldehído	1.35%	35,81%		85.4%	49.75%	0,62%				
Humuleno								3.97%	1.9%	
Eugenol	76.85%	12,41%	8.9%	0.2%	1.27%					
Biciclogermacreno								2.83%		
Germacrene							0.6%	2.05%	0.8%	
Copaeno	0.68%	0,19%		0.6%		3,66%		6.23%	0.2%	
Cariofileno	2.97%			0.5%			3.4%	10.71%	3.3%	
Acetato de cinamilo	1.38%				30.26%					
γ-Elemene		1,31%					0.3%	0.63%	1.3%	
Benzoato de bencilo	3.87%									
Limoneno		10,54%					3.8%	8.23%		
Mirceno		0,09%					1.9%	6.23%	1.3%	
γ-terpineno		2,71%					0.1%	3.66%	0.5%	
Alcanfor		0,70%					73.8%	10.6%	5.0%	
β-felandreno		8,21%								
Isoterpinoleno		1,37%								
trans-Carveol		1,31%								
2-metoxicinamaldehído						5,07%				
trans- cinnamaldehído						81,86%				
4-terpineol	0.10%		3.5%	0.4%					1.1%	

Fuentes: [34] [41][42][43][44][45][46][47][48]

Aceites esenciales del género *Cinnamomum* spp. para el control biológico de hongos fitopatógenos

Los hongos son los principales causantes de las enfermedades en plantas, representando el grupo más variado de riesgo ecológico a nivel mundial, en su mayoría pertenecen a basidiomicetos y ascomicetos, utilizando distintos métodos de invasión, generando una sobreproducción de factores de virulencia que le permitan desarrollar de manera benéfica la colonización, hongos como *Alternaria solani* y *Rhizoctonia solani* tienen mecanismos necrotrófico, lo que quiere decir que luego de generar toxinas para matar su huésped se alimentan de ese material, mientras que *Fusarium oxysporum* coloniza el tejido vivo, generando moléculas efectoras que le permitan inhibir la muerte vegetal y le permita manipular el metabolismo de la planta denominado biótrofo, por esto, la aplicación de métodos para el control biológico que sean prometedores requieren una profundización investigativa. En la siguiente tabla se comparan los resultados del comportamiento de los aceites de canela en los 3 fitopatógenos usados en distintos estudios y así evaluar la viabilidad de los resultados obtenidos con una concentración mínima inhibitoria (CMI) para uso en cultivos agrícolas para superar la problemática e innovar las tecnologías de biocontrol en medio de la creciente demanda de estos productos y así abordar una agricultura sostenible a perspectivas futuras llegando a una estabilidad y supervivencia. [49]

Los resultados realizados en diferentes investigaciones son variables tanto en CMI como en efectividad a los 3 fitopatógenos propuestos, esta variabilidad de resultados permite discutir la aplicación de los AE de canela para su control. Como se evidencia el aceite que cuenta con más investigaciones realizadas sobre estos patógenos vegetales es el aceite *C. zeylanicum*, presenta un potencial para tratar la enfermedad que genera *A. solani*, ya que los autores Ramírez S. *et al.*, 2016 y Bahraminejad *et al.*, 2017, con CMI de 0.05% y 1.0 µl/ml respectivamente, coinciden en inhibir *A. solani* en un 100%, sin excluir el impedimento de desarrollo que este presenta frente a los otros 2 fitopatógenos mencionados, nuevamente Ramírez S. *et al.*, 2016, que adicionalmente usaron *F. oxysporum*, con una CMI de 0,05% pudo inhibir un 73.2% el crecimiento del patógeno, y Juárez E., 2017, en el cual determinaron el comportamiento inhibitorio con *R. solani*, a una CMI de 300 ppm tiene una actividad inhibitoria de 66.74 %, siendo este un excelente candidato para mitigar el uso de plaguicidas químicos que puedan resultar tóxicos. [50][51]

Frente a los aceites *C. cassia* y *C. camphora*, que han sido investigados para diferentes fitopatógenos, lamentablemente en los 3 fitopatógenos seleccionados aún falta profundizar la propuesta de acción inhibitoria frente a ellos, sin embargo, hay algunos autores que han planteado unas bases que permitirán potenciar esta formulación antifúngica, en el caso de *C. cassia*, los autores Xie *et al.*, 2017, proponen evaluar la actividad inhibitoria del aceite contra *F. oxysporum* y de *R. solani*, trabajaron una CMI de 400 µg / mL, sin embargo los porcentajes de acción no son muy altos, siendo 28,50% y 54,80% respectivamente. [45]

Igualmente pasa con *C. camphora*, que carece de información investigativa frente a los fitopatógenos seleccionados en específico, sin embargo en el artículo de investigación (Tomazoni *et al.*, 2017), encontrado se obtienen resultados prometedores frente al comportamiento sobre *A. solani*, a una CMI de 1.5 µL, se obtiene una actividad inhibitoria total (100%), lo cual nos llevaría a concluir que los aceites de canela tienen un potencial para nuevos usos frente al manejo de tizón temprano ocasionado por *A. solani*. [53]

Cuadro 2. Comparación de actividad antifúngica de los AE de canela

Aceite esencial	Fitopatógeno	Método	CMI	Acción	% Inhibición	Referencia
<i>Cinnamomum zeylanicum</i>	<i>Alternaria solani</i>	Placa (Agar PDA modificado con AE)	0.05 y 0.01%	Inhibición del crecimiento	0.05% = 100% Crecimiento micelial y 100% formación de conidios 0.01% = 16.5% el crecimiento micelial y 50.23% formación de conidio	[50]
	<i>Alternaria solani</i>	Placa (Agar PDA modificado con AE)	1.0 µl/ml.	Inhibición del crecimiento	100%	[51]
	<i>Fusarium oxysporum</i>	Placa (Agar PDA modificado con AE)	0.05 y 0.01%	Inhibición del crecimiento	0.05% = 73.2 % Crecimiento micelial y 100% formación de conidios 0.01% = 6.5 % Crecimiento micelial y 22.4 % formación de conidios	[50]
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Placa (Agar PDA modificado con AE)	100 ppm 200 ppm 300 ppm	Inhibición del crecimiento	100 ppm: 4.6 % 200 ppm : 14.00 % 300 ppm: 66.74 %	[52]
<i>Cinnamomum cassia</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	Placa (Agar PDA modificado con AE)	400 µg / mL	Acción fungicida	28,50%	[45]
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Placa (Agar PDA modificado con AE)	400 µg / mL	Acción fungicida	54,80%	[45]
<i>Cinnamomum camphora</i>	<i>Alternaria solani</i>	Placa (Agar PDA modificado con AE)	1.0 µL 1.5 µL	Acción fungicida	1.0 µL: 27.88% 1.5 µL: 100%	[53]

Fuentes: [45] [50] [51] [52] [53]

Finalmente se podría agregar, que esto determina un nuevo horizonte para continuar en la investigación, teniendo en cuenta la cantidad numerosa de AE y de fitopatógenos de múltiples especies, se podría contemplar la idea de ampliar las posibilidades del uso de AE del género *Cinnamomum* en estos 3 fitopatógenos distribuidos ubicuamente a nivel mundial, partiendo de unos porcentajes de inhibición brindados por los autores anteriormente mencionados.

Discusión y conclusiones

La solución convencional más usada actualmente es el uso de plaguicidas químicos que contienen compuestos tóxicos los cuales generan problemáticas de salud pública y de diferentes ecosistemas, además el uso persistente de estos plaguicidas en el afán de aumentar el rendimiento y ganancias por parte de diferentes agricultores ha generado una evolución de cepas resistentes de innumerables especies de fitopatógenos distribuidos ampliamente en el suelo a nivel mundial, afectando también la exportación, el desarrollo sostenible y la economía de los diferentes países los cuales tienen como base económica la agricultura. [54] [55] [56]

Diferentes investigaciones que buscan alternativas para solucionar la problemática de resistencia y toxicidad generada por los plaguicidas han adquirido fuerza durante los últimos años, en cuanto a microorganismos patógenos las investigaciones que podrían adquirir más fuerza inclinadas hacia el uso de AE extraídos de diferentes plantas como la menta, tomillo, orégano, etc, evaluando en varios estudios el comportamiento de diferentes fitopatógenos, también sus componentes y acción inhibitoria obteniendo resultados experimentales que permiten una introducción al potencial oculto que tienen estos aceites de las diferentes plantas, permitiendo comparar los beneficios y desventajas que estas podrían generar, sin duda alguna, implican más trabajo pero es una solución alterna prometedora que mitigaría los diferentes riesgos de salud a los que actualmente están sometidos diferentes especies, adicionalmente tendría un impacto positivo en la economía mundial al reducir las plagas y al mismo tiempo las afecciones causadas por los plaguicidas. [57] [58] [59] [60].

El empleo comercial de la canela para diferentes actividades y la propuesta del uso de una especia conocida para inhibir fitopatógenos es bastante intrigante, esto se basa en diferentes estudios que comprueban la efectividad de este con diferentes fitopatógenos como bacterias en el caso del estudio realizado por Chen *et al.*, 2020 en el cual evaluaron el comportamiento de *C. camphora* con *B. subtilis*, *S.gallinarum*, *S. aureus*, *E. faecalis* y *E. coli*, en el cual se evidenció la buena actividad que este tuvo al aumentar la apoptosis de cada una de estas.[34]

Otros fitopatógenos en los cuales se ha estudiado la efectividad de las diferentes especies de aceites de canela son los hongos, siendo también un amplio campo de estudio, unos hongos de importancia a nivel mundial son *A. solani*, *F. oxysporum* y *R. solani*, por las diferentes enfermedades vegetales que estos pueden generar se propone continuar innovando con aportes científicos que permitan conocer más del comportamiento del aceite esencial de canela ya que en *A. solani* los autores concuerdan en que los AE del género *Cinnamomum* como *C. zeylanicum* y *C. camphora* presentan un potencial prometedor para mitigar el microorganismo que genera el tizón temprano especialmente en cultivos de papa y tomate, sin embargo falta más investigación del comportamiento inhibitorio de estos aceites frente a *F. oxysporum* y *R. solani* siendo estos de esparcimiento ubicuo a nivel mundial, la inhibición de estos sería de gran avance. También es importante sembrar la duda de que pasaría si se combinan los aceites de canela de diferente género y que acción presentaría estos frente a la limitación de crecimiento del fitopatógeno, cabe resaltar que es un campo amplio de investigación el cual no tendría limitaciones para su aplicación, se abre la puerta a continuar investigando la forma de acción de los AE de canela, ¿por qué inhibe más unas especies que otras?, ¿si solo tiene que ver con el comportamiento génico del patógeno o si también tiene que ver con la presencia y ausencia de los diferentes componentes del aceite extraído?, son preguntas que solo las próximas investigaciones podrán resolver, partiendo de las bases firmes y comprometedoras que hasta el momento se han encontrado [45][50] [51] [52] [53]

El aceite esencial de canela presenta resultados variables en diferentes investigaciones, pero lo más importante siendo un método de control biológico que promete una nueva alternativa para evitar el uso de plaguicidas tóxicos, lo cual mitigaría problemáticas de salud pública y enfermedades animales que pueden generar los componentes químicos que contienen los plaguicidas.

Agradecimientos

A la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Referencias

- [1] del Puerto Rodríguez, A. M., Suárez Tamayo, S., & Palacio Estrada, D. E. Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(3), 372-387. (2014).
- [2] Liberal D, Universitat Politècnica de València, E. Evaluación del potencial antifúngico de los aceites esenciales comerciales de Canela (*Cinnamomum verum* J. Presl) y Laurel (*Laurus nobilis* L.) En el control de *Botryotinia fuckeliana* (de Bary) Whetzel, *Epicoccum nigrum* Link, *Curvularia hawaiiensis* Manamgoda, L. Cai, K.D. Hyde y *Aspergillus niger* van Tieghem., Universitat Politècnica de València. *Ingeniería del agua*, 18(1), ix. (2014). <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>
- [3] Andrade, G., García, A., Cervantes, L., Aíl C., Borboa, J., & Rueda, E. Study of the autochthonous plants as a potential biocontroller in. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. (2017).
- [4] Boukaew, S., Prasertsan, P., & Sattayasamitsathit, S. Evaluation of antifungal activity of essential oils against aflatoxigenic *Aspergillus flavus* and their allelopathic activity from fumigation to protect maize seeds during storage. *Industrial Crops and Products*, 97, 558-566. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.005>
- [5] Cardoso, G. A., López, A., & Sosa, M. E. Chapter 38—Cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) Essential Oils. En V. R. Preedy (Ed.), *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety* (pp. 339-347). Academic Press. (2016). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00038-9>
- [6] Hamidpour, R., Hamidpour, M., Hamidpour, S., & Shahlari, M. Cinnamon from the selection of traditional applications to its novel effects on the inhibition of angiogenesis in cancer cells and prevention of Alzheimer's disease, and a series of functions such as antioxidant, anticholesterol, antidiabetes, antibacterial, antifungal, nematocidal, acaracidal, and repellent activities. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 5(2), 66-70. (2015). <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2014.11.008>
- [7] Almatroodi, S. A., Alsahli, M. A., Almatroudi, A., Anwar, S., Verma, A. K., Dev, K., & Rahmani, A. H. Cinnamon and its active compounds: A potential candidate in disease and tumour management through modulating various genes activity. *Gene Reports*, 21, 100966. (2020) <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2020.100966>
- [8] Fan, L., Luo, Z., Li, Y., Liu, X., Fan, J., Xue, W., Tang, L., & Li, Y. Synthesis and antifungal activity of imidazo[1,2-b] pyridazine derivatives against phytopathogenic fungi. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 30(14), 127139. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2020.127139>
- [9] Chávez-Ramírez, B., Kerber-Díaz, J. C., Acoltzi-Conde, M. C., Ibarra, J. A., Vásquez-Murrieta, M.-S., & Estrada-de los Santos, P. Inhibition of *Rhizoctonia solani* RhCh-14 and *Pythium ultimum* PyFr-14 by *Paenibacillus polymyxa* NMA1017 and *Burkholderia cenocepacia* CACua-24: A proposal for biocontrol of phytopathogenic fungi. *Microbiological Research*, 230, 126347. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126347>
- [10] Iftikhar, S., Shahid, A. A., Halim, S. A., Wolters, P. J., Vleeshouwers, V. G. A. A., Khan, A., Al-Harrasi, A., & Ahmad, S. Discovering Novel *Alternaria solani* Succinate Dehydrogenase Inhibitors by in Silico Modeling and Virtual Screening Strategies to Combat Early Blight. *Frontiers in Chemistry*, 5. (2017). <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00100>
- [11] Leite, G. L. D., & Fialho, A. Chapter 14—Protection of Tomatoes Using Bagging Technology and Its Role in IPM of Arthropod Pests. En W. Wakil, G. E. Brust, & T. M. Perring (Eds.), *Sustainable Management of Arthropod Pests of Tomato* (pp. 305-311). Academic Press. (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802441-6.00014-0>
- [12] Brouwer, S. M., Odilbekov, F., Burra, D. D., Lenman, M., Hedley, P. E., Grenville-Briggs, L., Alexandersson, E., Liljeroth, E., & Andreasson, E. Intact salicylic acid signalling is required for potato defence against the necrotrophic fungus *Alternaria solani*. *Plant Molecular Biology*, 104(1), 1-19. (2020) <https://doi.org/10.1007/s11103-020-01019-6>
- [13] Woudenberg, J. H. C., Truter, M., Groenewald, J. Z., & Crous, P. Large-spored *Alternaria* pathogens in section *Porri* disentangled. *Studies in Mycology*, 79, 1-47. (2014). <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2014.07.003>

- [14] Adhikari, T. B., Gao, A., Ingram, T., & Louws, F. J. Pathogenomics Characterization of an Emerging Fungal Pathogen, *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici* in Greenhouse Tomato Production Systems. *Frontiers in Microbiology*, 11. (2020). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01995>
- [15] de Lamo, F. J., & Takken, F. L. *Biocontrol by Fusarium oxysporum Using Endophyte-Mediated Resistance*. (2020, febrero 6). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7015898/>
- [16] A.Juarez-Garcia, R., Sanzon, D., Ramirez, L. F., Ruiz Nieto, J., & Hernández-Ruíz, J. *Inhibición del crecimiento in vitro de Fusarium oxysporum Schltdl con extracto de Argemone ochroleuca Seet (Papaveraceae)*. 2020, 1-8. (2020). <https://doi.org/10.30973/aap/2020.6.0061012>
- [17] Zrenner, R., Verwaaijen, B., Genzel, F., Flemer, B., & Grosch, R. Transcriptional Changes in Potato Sprouts upon Interaction with *Rhizoctonia solani* Indicate Pathogen-Induced Interference in the Defence Pathways of Potato. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(6). (2021). <https://doi.org/10.3390/ijms22063094>
- [18] Lee, D.-Y., Jeon, J., Kim, K.-T., Cheong, K., Song, H., Choi, G., Ko, J., Opiyo, S. O., Correll, J. C., Zuo, S., Madhav, S., Wang, G.-L., & Lee, Y.-H. Comparative genome analyses of four rice-infecting *Rhizoctonia solani* isolates reveal extensive enrichment of homogalacturonan modification genes. *BMC Genomics*, 22. (2021). <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07549-7>
- [19] Hashem, A. H., Abdelaziz, A. M., Askar, A. A., Fouda, H. M., Khalil, A. M. A., Abd-Elsalam, K. A., & Khaleil, M. M. *Bacillus megaterium*-Mediated Synthesis of Selenium Nanoparticles and Their Antifungal Activity against *Rhizoctonia solani* in Faba Bean Plants. *Journal of Fungi*, 7(3). (2021). <https://doi.org/10.3390/jof7030195>
- [20] Hiroyuki Sekiguchi, Takeshi Toda, Erika Sato, Keisuke Tomioka, Hiroharu Murakami, Ryota Amemiya, Naoyuki Hirako, Masato Nakata, Mitsuro Hyakumachi, & Seiya Tsushima. *Rhizoctonia blight of turnip green caused by Rhizoctonia solani AG-4 HG-III*. (2015, agosto 29). <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2425/article/10.1007/s10327-015-0616-9>
- [21] Delong, W., Yongling, W., Lanying, W., Juntao, F., & Xing, Z. Design, synthesis and evaluation of 3-arylide-ne azetidín-2-ones as potential antifungal agents against *Alternaria solani* Sorauer. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 25(24), 6661-6673. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2017.11.003>
- [22] Aizaga Zurita Sofía Jacqueline *Proyecto de investigación presentado como requisito previo a la obtención del título de Odontóloga*. (2017).
- [23] Rivera, C. D. N., Portilla, D. E., Chavez, G. S., Medina, D. R. F., Hernández, N. G. H., Ingunza, E. L. G., & Arteaga, M. A. B. Efecto hipoglicémico de la canela *cinnamomum verum* j.Presl en ratas inducidas a hiperglicemia con estreptozocina. *Medicina naturista*, 15(1), 80-89. (2021).
- [24] Sánchez miranda luisa.pdf. (s. f.). Recuperado 15 de octubre de 2020, de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/25267/S%C3%81NCHEZ%20MIRANDA%20LUIZA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [25] [Aru S., Cinnamomum zeylanicum Blume \(LAURACEAE\) Captured at Nuclear Science Building. \(2008\). https://www.flickr.com/search/?text=Cinnamomum%20zeylanicum%20tree](https://www.flickr.com/search/?text=Cinnamomum%20zeylanicum%20tree)
- [26] Sarmiento Lurdes, «Casia (Cinnamomum Cassia)», JardineríaOn, árboles y arbustos, septiembre 19 2018, Accedido: oct. 15, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.jardineriaon.com/casia-cinnamomum-cassia.html>
- [27] Bissantì, G. Cinnamomum cassia: Sistemática, Etimología, Habitat, Coltivazione *Un Mondo Ecosostenibile*. (2019, julio 27) <http://antropocene.it/en/2019/07/27/cinnamomum-cassia/>
- [28] Sánchez de lorenzo Cáceres José Manuel, «Cinnamomum camphora», Accedido: oct. 15, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.arbolesornamentales.es/Cinnamomum%20camphora.pdf>
- [29] Bonells J. EL CINNAMOMUM CAMPHORA Y SUS CULTIVARES. *Jardines sin fronteras*. (2020, febrero 10). <https://jardinessinfronteras.com/2020/02/10/el-cinnamomum-camphora-y-sus-cultivares/>
- [30] Ribeiro-Santos, R., Andrade, M., Madella, D., Martinazzo, A. P., de Aquino García Moura, L., de Melo, N. R., & Sanches-Silva, A. Revisiting an ancient spice with medicinal purposes: Cinnamon. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 154-169. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.011>
- [31] Aramrueang, N., Asavasanti, S., & Khanunthong, A. Chapter 10—Leafy Vegetables. En Z. Pan, R. Zhang, & S. Zicari (Eds.), *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products* (pp. 245-272). Academic Press. (2019). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00010-1>
- [32] Yu, H., Ren, X., Liu, Y., Xie, Y., Guo, Y., Cheng, Y., Qian, H., & Yao, W. Extraction of Cinnamomum camphora chvar. Borneol essential oil using neutral cellulase assisted-steam distillation: Optimization of extraction, and analysis of chemical constituents. *Industrial Crops and Products*, 141, 111794. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111794>

- [33] Radivojac, A., Bera, O., Micić, D., Đurović, S., Zeković, Z., Blagojević, S., & Pavlić, B. Conventional versus microwave-assisted hydrodistillation of sage herbal dust: Kinetics modeling and physico-chemical properties of essential oil. *Food and Bioprocess Processing*, 123, 90-101. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.015>
- [34] Chen, G., Sun, F., Wang, S., Wang, W., Dong, J., & Gao, F. Enhanced extraction of essential oil from *Cinnamomum cassia* bark by ultrasound assisted hydrodistillation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.08.007>
- [35] Ghazanfari, N., Mortazavi, S. A., Yazdi, F. T., & Mohammadi, M. Microwave-assisted hydrodistillation extraction of essential oil from coriander seeds and evaluation of their composition, antioxidant, and antimicrobial activity. *Heliyon*, 6(9), e04893. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04893>
- [36] Dangkulwanich, M., & Charaslertrangsi, T. *Hydrodistillation and antimicrobial properties of lemongrass oil (Cymbopogon citratus, Stapf): An undergraduate laboratory exercise bridging chemistry and microbiology*. Science Division, Mahidol University International College, Nakhon Pathom, Thailand. (2020). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1541-4329.12178>
- [37] Elyemni, M., Louaste, B., Nechad, I., Elkamli, T., Bouia, A., Taleb, M., Chaouch, M., & Eloutassi, N. Extraction of Essential Oils of *Rosmarinus officinalis* L. by Two Different Methods: Hydrodistillation and Microwave Assisted Hydrodistillation. *The Scientific World Journal*, 2019, e3659432. (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/3659432>
- [38] Kaleem, M., & Ahmad, A. Chapter 8—Flavonoids as Nutraceuticals. En A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), *Therapeutic, Probiotic, and Unconventional Foods* (pp. 137-155). Academic Press. (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814625-5.00008-X>
- [39] Loyo, R. M., Zarate, E., Barbosa, C. S., & Simoes-Barbosa, A. Gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS) reveals urine metabolites associated to light and heavy infections by *Schistosoma mansoni* in mice. *Parasitology International*, 80, 102239. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.parint.2020.102239>
- [40] V.S. Pragadheesh, Arvind Saroj, Anju Yadav, C.S. Chanotiya, M. Alam, A. Samad, Chemical characterization, and antifungal activity of *Cinnamomum campho* essential oil, *Industrial Crops and Products*, Volume 49, Pages 628-633, ISSN 0926-6690, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.06.023>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669013003129>
- [41] Božik M., Nový P., Klouček P, Chemical composition and antimicrobial activity of cinnamon, thyme, oregano, and clove essential oils against plant pathogenic bacteria, *acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*. (2017)
- [42] Kalagatur, N. K., Gurunathan, S., Kamasani, J. R., Gunti, L., Kadirvelu, K., Mohan, C. D., Rangappa, S., Prasad, R., Almeida, F., Mudili, V., & Siddaiah, C. Inhibitory effect of *C. zeylanicum*, *C. longa*, *O. basilicum*, *Z. officinale*, and *C. martini* essential oils on growth and ochratoxin A content of *A. ochraceus* and *P. verrucosum* in maize grains. *Biotechnology Reports*, 27, e00490. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00490>
- [43] Yasmin, S., Nawaz, M., Anjum, A. A., Ashraf, K., Basra, M. A. R., Mehmood, A., Khan, I., & Malik, F. Phytochemical Analysis, and In Vitro Activity of Essential Oils of Selected Plants against *Salmonella enteritidis* and *Salmonella gallinarum* of Poultry Origin. *Pakistan Veterinary Journal*, 40(2), 139-144. Academic Search Complete. (2020).
- [44] Jeyaratnam, N., Nour, A. H., Kanthasamy, R., Nour, A. H., Yuvaraj, A. R., & Akindoyo, J. O. Essential oil from *Cinnamomum cassia* bark through hydrodistillation and advanced microwave assisted hydrodistillation. *Industrial Crops and Products*, 92, 57-66. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.07.049>
- [45] Xie, Y., Huang, Q., Wang, Z., Cao, H., & Zhang, D. Structure-activity relationships of cinnamaldehyde and eugenol derivatives against plant pathogenic fungi. *Industrial Crops and Products*, 97, 388-394 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.043>
- [46] Chen, J., Tang, C., Zhang, R., Ye, S., Zhao, Z., Huang, Y., Xu, X., Lan, W., & Yang, D. Metabolomics analysis to evaluate the antibacterial activity of the essential oil from the leaves of *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl. *Journal of Ethnopharmacology*, 253, 112652. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.112652>
- [47] Xiao, S., Yu, H., Xie, Y., Guo, Y., Fan, J., & Yao, W. The anti-inflammatory potential of *Cinnamomum camphora* (L.) J.Presl essential oil in vitro and in vivo. *Journal of Ethnopharmacology*, 113516. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113516>
- [48] Filho, J. G. de O., Silva, G. da C., Aguiar, A. C. de, Cipriano, L., Azeredo, H. M. C. de, Junior, S. B., & Ferreira, M. D. Chemical composition and antifungal activity of essential oils and their combinations against *Botrytis cinerea* in strawberries. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-11. (2021). <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00765-x>
- [49] Sharma, I. Chapter 7—Phytopathogenic fungi and their biocontrol applications. En V. K. Sharma, M. P. Shah, S. Parmar, & A. Kumar (Eds.), *Fungi Bio-Prospects in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-Technology* (pp. 155-188). Academic Press (2021).. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821394-0.00007-X>

- [50] Ramírez González, S. I., López Báez, O., Espinosa Zaragoza, S., & Wong Villarreal, A. (s. f.). *Actividad antifúngica de hidrodestilados y aceites sobre Alternaria solani, Fusarium oxysporum y Colletotrichum gloesporioides*. Recuperado 21 de septiembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342016000801879&script=sci_arttext
- [51] Bahraminejad, S., Seifolahpour, B., & Amiri, R. *Antifungal effects of some medicinal and aromatic plant essential oils against Alternaria solani*. (2017).
- [52] Juarez, E. Y. *Efecto antifúngico del aceite esencial de cinnamomum zeylanicum blume "canela" sobre el crecimiento de Rhizoctonia solani J.G. Kühn*. (2017).
- [53] Tomazoni, E. Z., Pauletti, G. F., da Silva Ribeiro, R. T., Moura, S., & Schwambach, J. In vitro and in vivo activity of essential oils extracted from Eucalyptus staigeriana, Eucalyptus globulus and Cinnamomum camphora against Alternaria solani Sorauer causing early blight in tomato. *Scientia Horticulturae*, 223, 72-77. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.033>
- [54] Li, C., Zhu, H., Li, C., Qian, H., Yao, W., & Guo, Y. The present situation of pesticide residues in China and their removal and transformation during food processing. *Food Chemistry*, 354, 129552. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129552>
- [55] Knödler, M., Häfner, E., Klier, B., Albert, H., Binder, G., Schenk, A., & Steinhoff, B. Evaluating a comprehensive database on pesticide residues in essential oils: An update. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 20, 100283. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100283>
- [56] Tambo, J. A., Romney, D., Mugambi, I., Mbugua, F., Bundi, M., Uzayisenga, B., Matimelo, M., & Ndhlovu, M. Can plant clinics enhance judicious use of pesticides? Evidence from Rwanda and Zambia. *Food Policy*, 102073. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102073>
- [57] Universidad de Caldas, Noriega, D., Valencia, A., Universidad de Caldas, Villegas, B., & Universidad de Caldas. ARN de interferencia (ARNi): Una tecnología novedosa con potencial para el control de insectos plaga. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(1). (2016). <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n1.2016.107>
- [58] Navarro, L. Respuestas moleculares de insectos a factores de estrés ambientales y biológicos. En P. Benavides Machado & C. E. Góngora (Eds.), *El Control Natural de Insectos en el Ecosistema Cafetero Colombiano* (pp. 142–157). Cenicafé. (2020). https://doi.org/10.38141/10791/0001_6
- [59] Montero-Recalde, M., Mira, J. C., Avilés-Esquivel, D., Pazmiño-Miranda, P., & Erazo-Gutiérrez, R. Eficacia antimicrobiana del aceite esencial de tomillo (*Thymus vulgaris*) sobre una cepa de *Staphylococcus aureus*. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 29(2), 588-593. (2018). <https://doi.org/10.15381/rivep.v29i2.14520>
- [60] Lozano, O., & Berenice, A. *Determinación del efecto antimicrobiano de los aceites esenciales de tomillo (Thymus vulgaris) y orégano (Origanum vulgare) frente a la bacteria Staphylococcus aureus ATCC: 12600*. 96. (2018)

Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestal con Palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)¹



Evaluation of soil fertility in agroforestry systems with African Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Parménides Furcal-Beriguete², Zeydi Robles-Argüello³, Ricardo Salazar-Díaz⁴

Fecha de recepción: 26 de enero, 2022
Fecha de aprobación: 18 de mayo, 2022

Furcal-Beriguete, P; Robles-Argüello, Z; Salazar-Díaz, R.
Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestal con Palma Africana (*Elaeis guineensis* jacq.). *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 20-31.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5903>

- 1 Este trabajo forma parte del proyecto de investigación Modelación de producción, protección y evaluación económica de cultivos en sistemas agroforestales de cacao en Osa y Golfito, código 1431031, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, TEC.
- 2 Centro de Investigaciones y Desarrollo en Agricultura Sostenible del Trópico Húmedo (CIDASTH), Campus Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: pafurcal@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8695-4523>
- 3 Escuela de Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: zeydyrobles@gmail.com
- 4 Escuela de Agronegocios, Centro de Investigación y Gestión Agroindustrial (CIGA), Campus Central, Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: risalazar@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1954-0133>

Palabras clave

Contenido de nutrientes en suelos; sistema agroforestal; características de suelos; *Cordia megalantha*; *Theobroma cacao*.

Resumen

Se muestrearon cinco parcelas de tres años, establecidas por la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO), cada parcela constaba con dos tratamientos los cuales fueron sistema agroforestal (SAF) integrado por *E. guineensis*, *C. megalantha*, *T. cacao* y *Musa sp*, y el monocultivo de *E. guineensis*; cuyo objetivo fue evaluar el efecto de un sistema productivo agroforestal con *Elaeis guineensis* sobre la fertilidad fisicoquímica del suelo. Se determinó la densidad aparente del suelo y se extrajeron muestras compuestas en dos profundidades, obteniéndose el contenido de nutrientes, la materia orgánica, la densidad de partículas y la porosidad. Los datos fueron analizados estadísticamente en donde las parcelas fungieron como bloques, sin mostrar diferencias significativas para algunas variables edáficas y elementos evaluados; sin embargo, el contenido de fósforo fue significativamente más alto en el SAF y disminuyó con la profundidad del suelo 0 – 20 cm a 20 – 40 cm, el magnesio aumentó estadísticamente del año 2019 al 2020, igualmente que la materia orgánica, el carbono y el nitrógeno total y fueron superiores en la superficie (0 -20 cm) que a la profundidad 20 - 40 cm.

Keywords

Nutrient content in soil; agroforestry system; soil characteristics; *Cordia megalantha*; *Theobroma cacao*.

Abstract

Five three-year-old plots established by the Osa & Golfito Initiative (INOGO) were sampled, where each experimental plot consisted of two treatments, corresponding to an agroforestry system and a monoculture system of *E. guineensis*. Whose objective was to evaluate the effect of an agroforestry production system with *Elaeis guineensis* on the physicochemical fertility of the soil. The agroforestry system was integrated by *E. guineensis*, *Cordia megalantha*, *Theobroma cacao* and *Musa sp*. The bulk density of the soil was determined and composite samples were extracted at two depths, obtaining nutrient content, organic matter, particle density and porosity. The data were statistically analyzed where the plots served as blocks, without showing significant differences for some edaphic variables and elements evaluated; however, phosphorus content was significantly higher in FAS and decreased with soil depth from 0 - 20 cm to 20 - 40 cm, magnesium increased statistically from 2019 to 2020, as well as organic matter, carbon and total nitrogen and were higher at the surface (0 -20 cm) than at the depth of (20 - 40 cm).

Introducción

En Costa Rica, la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) es el segundo cultivo perenne con mayor área sembrada, aproximadamente 76.910 ha se encuentran dedicadas a su producción, con un alcance en el 2018 de 1.087.800 t [1], y una exportación del 65 % de la producción de aceite [2]. En la región Brunca, el cultivo de *E. guineensis* tiene gran importancia e impacto en los sectores económico, social y ambiental [3]; en esta zona se concentra el 68 % del área cultivada a nivel nacional [2]. En los cantones de Osa y Golfito es el principal cultivo agrícola en producción. Sin embargo, el monocultivo en el que se produce y su expansión es vista con preocupación por los ambientalistas [3].

En cualquier sistema de producción el suelo es un factor determinante y cada vez se vuelve un recurso más limitado. Aunado a esto, el monocultivo es una práctica que contribuye al deterioro del suelo a través del tiempo tanto físico, químico como biológico. En el cultivo de *E. guineensis* los problemas más comunes son el daño a la estructura del suelo que causa compactación lo que genera disminución de la tasa de infiltración y por consiguiente mayor escorrentía superficial [4], intensificando la pérdida de nutrientes a causa de la erosión.

La situación descrita permite establecer modelos más estables, entre ellos, los sistemas agroforestales (SAF) que permiten el cambio del uso del suelo con probabilidad de recuperarse de un estado de degradación y aumentar la productividad, entre otros [5], [6]. Los SAF aumentan el contenido de materia orgánica y con ello mejoran la estructura del suelo y otras propiedades físicas como la densidad aparente, la infiltración, la porosidad [7]. En ese orden, con los SAF se logra un aumento de la productividad y la eficiencia del uso del suelo del agroecosistema [8].

Esta investigación forma parte de la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO), que plantea implementar una estrategia para el desarrollo humano sostenible y la gestión ambiental en los cantones de Osa y Golfito de Costa Rica [3]. El Laboratorio Experimental de Palma Africana (LAPA) forma parte de esta iniciativa, investigando el impacto de entremezclar la *E. guineensis* con *Musa* sp., *Cordia megalantha* y *Theobroma cacao*, con el fin de determinar la capacidad de este sistema de compensar la pérdida de biodiversidad que ocurre en las plantaciones tradicionales. En ese sentido, se planteó como objetivo evaluar el efecto de un sistema de producción agroforestal con *E. guineensis* sobre la fertilidad fisicoquímica del suelo en el proyecto LAPA en los cantones de Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica.

Materiales y métodos

Localización y generalidades del proyecto

El área en estudio estuvo conformada de cinco parcelas ubicadas en las localidades de Chacarita, Piedras Blancas, Rancho Quemado, La Palma y La Guaria; las tres primeras pertenecen al cantón de Golfito, mientras que las dos últimas se localizan en el cantón de Osa, ambos en la provincia de Puntarenas, Costa Rica. Estas fueron establecidas y conducidas por el Laboratorio Experimental de Palma Africana Sostenible (LAPA) de la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO).

El cantón de Golfito se localiza en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano y el cantón de Osa en Bosque Muy Húmedo Tropical [9], presentan altas precipitaciones con promedios mensuales de 347,7 mm y 334,0 mm y altas temperaturas con rangos de 23,5 ° C a 29,2 ° C en Golfito y para la localidad de Piedras Blancas la precipitación promedio es de 509,9 mm y rango de temperatura de 21,9 ° C a 31,8 ° C en Río Claro [10].

Los órdenes de suelos son Ultisol principalmente, asociación Entisol-Inceptisol e Inceptisol, según el mapa de suelos de Costa Rica [11], Figura 1.

Los trabajos de campo se iniciaron en el primer semestre del año 2019 y finalizaron en noviembre de 2020. Las parcelas fueron establecidas en el año 2016, principalmente entre los meses de agosto a octubre, con la siembra de todos los cultivos, excepto las plántulas de *C. megalantha* y la parcela en Chacarita que se establecieron en el año 2017.

Para evaluar la fertilidad fisicoquímica del suelo, fueron consideradas variables que definen la acidez tales como pH, suma de bases, acidez extraíble y saturación de acidez; además de macro y microelementos, también la materia orgánica y la relación C/N. Por otro lado, se determinaron la densidad aparente (Dap) y la de partículas o real (Dr), con las cuales se obtuvo

la porosidad. Se tomaron muestras a dos profundidades 0 - 20 cm y 20 - 40 cm debido a que alrededor del 80 % de las raíces de las especies de plantas dentro de este sistema agroforestal no superan esta profundidad, se hicieron análisis químicos a través de las soluciones extractoras KCl-Olsen Modificado y el porcentaje de carbono y nitrógeno totales a través del método Autoanalizador Dumas. La acidez fue determinada por valoración con NaOH y el Al con HCl; el P y S por colorimetría con el Analizador de Inyección de Flujo (FIA) y los demás elementos como el potasio, calcio, magnesio y zinc por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

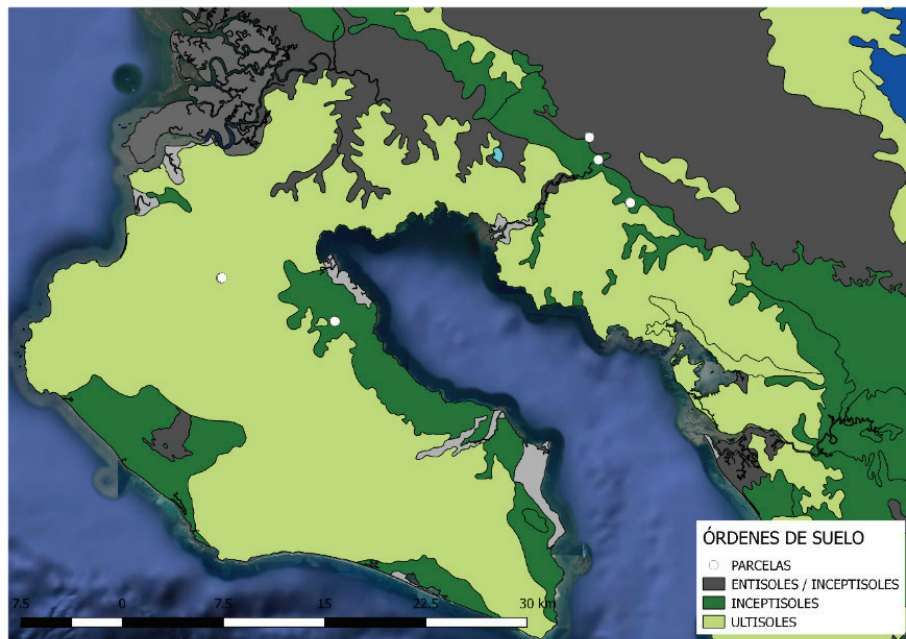


Figura 1. Órdenes de suelos presentes en las parcelas del proyecto LAPA, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. Fuente: Elaborado con base en CIA 2020 [11].

La Dap se determinó por el método de cilindros de volumen conocido, se tomaron tres muestras de suelo con tres repeticiones de 0 - 20 cm de profundidad en cada unidad experimental. Mientras que la Dr, en el segundo año, se determinó por el método del picnómetro.

Diseño experimental y arreglo de tratamientos

El experimento constó de cinco parcelas en localidades diferentes con dos tratamientos cada una, sistema agroforestal y monocultivo de palma, con un área de 5.000 m² cada tratamiento. Estos fueron un sistema agroforestal que combinó *E. guineensis* sembrada 9 m x 12 m para un total de 93 plantas/ha, *C. megalantha* (42 árboles/ha), *T. cacao* (632 árboles/ha) y *Musa* sp. (plátano, banano o cuadrado) (976 plantas/ha) y un control con *E. guineensis* en arreglo “tresbolillo” con 9 m x 9 m.

Se utilizó un Diseño de Parcelas Divididas con Bloqueo, con dos tratamientos y cinco repeticiones (localidades) por tratamiento. El factor A correspondió a cada parcela (localidades) y el factor B correspondió a los dos tratamientos dentro de cada parcela. Se usó la prueba de comparación de medias DGC (Di Rienzo, Guzmán y Casanoves, versión 2018), con un nivel de significancia de 0,05 [12].

Resultados

En este capítulo del estudio se muestran a continuación diferentes cuadros y figuras con los resultados obtenidos, los cuales posteriormente serán discutidos.

En el cuadro 1 se presentan los valores de variables de fertilidad química de suelos en los dos tratamientos, Sistemas Agroforestales (SAF) y Monocultivo de palma africana (*E. guineensis*) correspondientes a las cinco parcelas que conforman el proyecto LAPA.

Cuadro 1. Valores promedios de variables que inciden en la fertilidad los de suelos.

Variable	SAF				Monocultivo			
	Año		Año		Año		Año	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
	Profundidad de muestreo (cm)							
	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
pH	6,00	6,18	5,76	6,18	5,92	6,24	5,76	5,98
σ	0,88	0,80	0,69	0,72	0,55	0,84	0,37	0,58
Mín	5,00	5,20	4,90	5,40	5,10	5,20	5,30	5,20
AE (cmol(+)/L)	0,57	0,33	0,48	0,40	0,50	0,48	0,53	0,61
σ	0,79	0,43	0,62	0,45	0,64	0,70	0,49	0,64
Máx	2,14	1,20	1,71	1,28	1,77	1,88	1,18	1,62
S.bases (cmol(+)/L)	29,18	31,06	30,11	32,01	30,05	31,44	30,81	30,98
σ	14,73	15,00	15,11	16,60	13,47	14,61	15,09	14,71
Mín	5,87	6,81	5,97	5,02	7,09	6,93	7,52	6,78
S.A. (%)	2,81	3,3	4,94	4,46	4,52	4,58	3,5	4,64
σ	10,43	5,85	8,69	7,93	7,76	8,36	4,69	7,40
Máx	26,7	15	22,3	20,3	20	21	12,6	19,3
Ca (cmol(+)/L)	26,10	27,84	25,96	28,32	26,12	27,92	26,23	26,76
σ	14,74	15,36	14,71	16,52	13,80	15,19	14,92	14,81
Mín	4,49	5,30	4,30	4,07	5,15	5,69	5,63	5,34
Mg (cmol(+)/L)	2,81	3,01	3,69	3,39	3,65	3,34	4,13	3,96
σ	1,37	1,84	1,51	2,06	2,22	2,77	1,80	2,35
Mín	1,27	1,44	1,58	0,9	1,75	1,18	1,8	1,4
K (cmol(+)/L)	0,26	0,20	0,45	0,28	0,28	0,18	0,44	0,27
σ	0,13	0,10	0,36	0,22	0,14	0,09	0,36	0,18
Mín	0,11	0,07	0,09	0,05	0,16	0,06	0,09	0,04
Fósforo (mg/L)	6,00	7,50	6,40	6,00	4,00	5,40	4,80	4,00
σ	2,74	3,20	3,98	3,29	1,22	3,38	2,86	1,90
Mín	3,00	4,00	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00
Zn (mg/L) (Dst)	1,46	1,30	1,68	1,20	1,52	1,20	1,94	1,24
σ	0,45	0,33	0,51	0,55	0,50	0,30	0,46	0,50
Mín	0,70	0,80	1,10	0,20	1,00	0,80	1,40	0,50
MO (%)	3,33	2,01	4,02	2,34	3,30	2,30	4,16	2,34
σ	1,05	0,57	1,29	0,77	0,71	0,59	1,26	0,66
Mín	2,32	1,29	3,10	1,40	2,76	1,84	3,23	1,89

Nota: Desviación estándar (σ), Mínimo (Mín) y Máximo (Máx) para las variables: acidez extraíble (AE), suma de bases (S.bases), saturación de acidez (S.A.), materia orgánica (MO) y elementos químicos.

Los valores de la densidad aparente (Dap) y la porosidad de los suelos en dos años (2019 y 2020), y la densidad de partículas (real) en el año 2020, a la profundidad de 0 a 20 cm, relacionadas con las cinco localidades del proyecto LAPA, se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Valores promedios de variables físicas de los suelos en los dos tratamientos de las parcelas experimentales.

Variable	SAF		Monocultivo	
	Año		Año	
	2019	2020	2019	2020
	Profundidad de muestreo (0 – 20 cm)			
Localidad La Palma				
Densidad Real (g/ml)		2,22±0,03		2,34±0,03
Dap. (g/ml)	1,01±0,06	1,07±0,02	0,97±0,06	1,09±0,03
Porosidad (%)	61,89	59,81±0,93	63,40	58,84±1,23
Textura	Franco arcillo arenoso gravoso		Franco arcillo arenoso	
Localidad Rancho Quemado				
Densidad Real (g/ml)		2,26±0,04		2,35±0,02
Dap. (g/ml)	0,62±0,05	0,95±0,02	0,73 ±0,07	0,94±0,04
Porosidad (%)	76,60	64,05±0,93	72,45	64,58±1,47
Textura	Franco arcillo arenoso gravoso		Franco arcillo arenoso gravoso	
Localidad La Guaría				
Densidad Real (g/ml)		2,26±0,04		2,15±0,06
Dap. (g/ml)	0,89±0,02	0,94±0,02	0,91±0,02	0,87±0,02
Porosidad (%)	66,42	64,67±0,61	65,66	67,19±0,61
Textura	Franco gravoso		Franco arenoso gravoso	
Localidad Chacarita				
Densidad Real (g/ml)		2,34±0,03		2,39±0,01
Dap. (g/ml)	0,76±0,04	1,02±0,03	0,79±0,07	0,94±0,02
Porosidad (%)	71,32	61,55±1,12	70,19	64,66±0,76
Textura	Franco arenoso		Franco arenoso	
Localidad Piedras Blancas				
Densidad Real (g/ml)		2,17±0,04		2,24±0,04
Dap. (g/ml)	0,93±0,03	1,00±0,04	0,93±0,03	0,93±0,02
Porosidad (%)	64,91	62,27±1,46	64,91	64,93±0,57
Textura	Franco arenoso		Franco arenoso	

Fuente: Datos de 2019 y textura adaptados de Mack 2019 [13].

En la figura 2 se muestran los valores de fósforo y de magnesio, resultados obtenidos de los análisis a dos profundidades de suelos en dos períodos consecutivos en las cinco parcelas experimentales que conforman el proyecto LAPA.

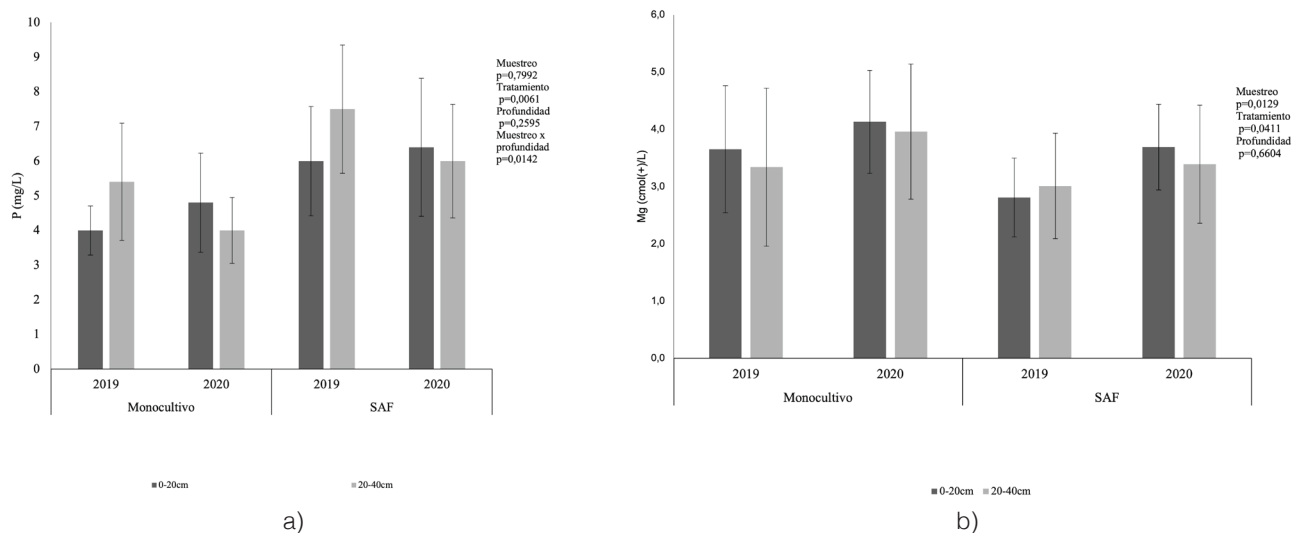


Figura 2. Valores promedio y error estándar de las variables fósforo (a) y magnesio (b), en los dos tratamientos de las parcelas experimentales del proyecto LAPA.

Nota: Medias con p-valor > 0,05 no presentan diferencias significativas entre sí, DGC (p-valor < 0,05).

En ese mismo aspecto, la figura 3 muestra los resultados de las variables físicas analizadas de los suelos porosidad y densidades aparente y real, variables que presentan comportamiento, excepto la densidad real, según el contenido de la materia orgánica y el manejo de los suelos.

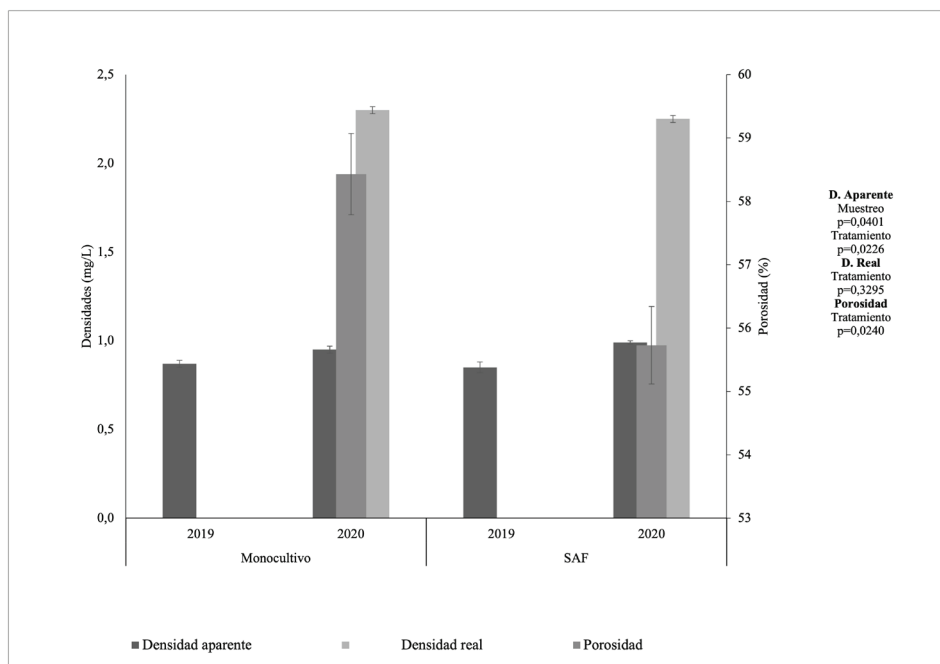


Figura 3. Valores promedio y error estándar de las densidades y porosidad de los suelos en los dos tratamientos de las parcelas experimentales del proyecto LAPA.

Nota: Medias con p-valor > 0,05 no presentan diferencias significativas entre sí, DGC (p-valor < 0,05).

Los resultados de los análisis de la materia orgánica, el nitrógeno y el carbono total, y las relaciones de estos dos últimos, variables importantes en el comportamiento de los suelos de acuerdo con su manejo, se visualizan en la figura 4.

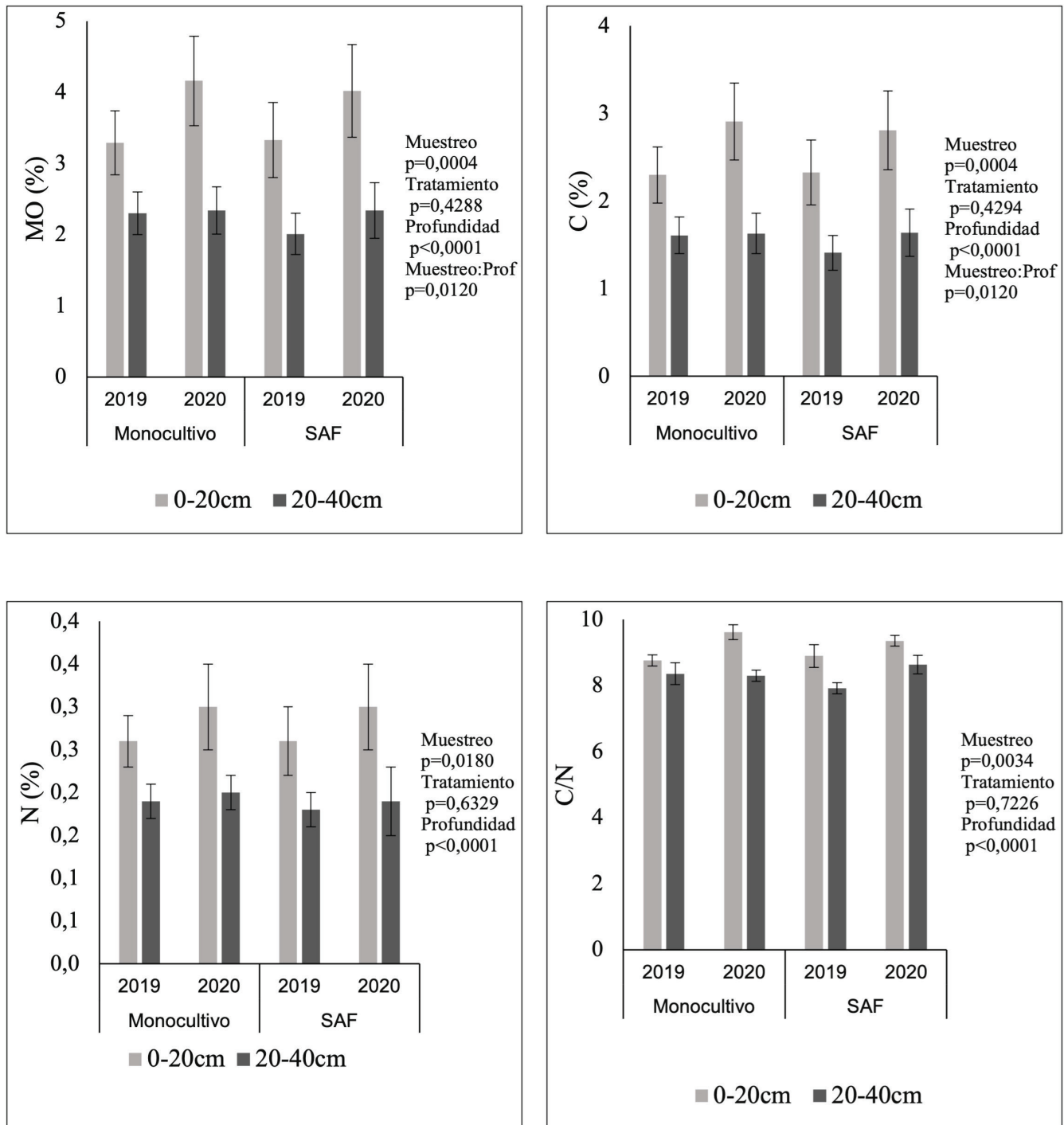


Figura 4. Valores promedio y error estándar para el porcentaje de materia orgánica (MO), carbono (C), nitrógeno (N) y relación carbono-nitrógeno (C/N) presentes en el suelo en ambos tratamientos de las parcelas experimentales del Proyecto LAPA.

Nota: Medias con p-valor > 0,05 no presentan diferencias significativas entre sí, DGC (p-valor < 0,05).

Discusión

Fertilidad de los suelos de las parcelas experimentales

Los suelos evaluados son suelos de fertilidad media a alta según [14]. Los rangos de pH encontrados en ambos tratamientos variaron entre 5,76 y 6,24. Según [15], [16] estos son aptos para *E. guineensis*, no dejando de lado otros cultivos. [17] menciona que el pH óptimo para musáceas y *T. cacao* se encuentra entre 6,0 y 7,0. Este mostró diferencias significativas (p -valor $\leq 0,05$) para profundidad y entre cada muestreo, siendo menor en los primeros 20 cm de profundidad y con tendencia a disminuir del año 2019 al año 2020 (Cuadro 1). Se puede sugerir que la variación es debido a la fecha de muestreo, en 2019 se hizo en época de pocas lluvias, mientras que en el 2020 en el período de muchas lluvias; [18] indica que en suelos de alta precipitación ocurre lixiviación de bases intercambiables y el pH tiende a disminuir.

La acidez extraíble en ambos tratamiento fue 0,33 a 0,6 cmol(+)/L, registrándose algunos valores por encima del nivel crítico [19]. En la mayoría de los cultivos valores superiores a 0,5 cmol(+)/L comienzan a ser perjudiciales, sin embargo, la suma de las bases intercambiables (Ca+Mg+K) presentaron valores por encima de 5 cmol(+)/L, con un rango entre 29,17 – 32 cmol(+)/L, producto principalmente de los relativos valores altos de Ca (Cuadro 1) lo que equilibra esta acidez [19], incidiendo en que la saturación de acidez sea baja (Cuadro 1), de modo que disminuye el efecto en los cultivos.

Dentro de las bases, el magnesio es el único elemento que mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (figura 2), en el monocultivo fue mayor que en el SAF y aumentó significativamente del año 2019 al año 2020, lo que puede estar asociado a la misma situación del pH, dado que la aplicación de abonos y enmiendas fue muy mínima a nula y al poco tiempo experimental (2 años) que aún los efectos beneficiosos del SAF [20] no se manifiesten; por el rango de valores encontrado en el suelo de este elemento, se asume que no limita el desarrollo de los cultivos presentes [16]. Los resultados del análisis de Ca concuerdan con lo mencionado por [21], que la mayoría de las plantaciones de *E. guineensis* en el sur del país están sembradas en suelos con alto contenido de este elemento; por otro lado, expresa que el K, en estos suelos donde se ubica este cultivo en el sur, es el elemento que con mayor frecuencia se encuentra desbalanceado respecto al Ca y al Mg; el K se encuentra a nivel medio aunque el valor mínimo está por debajo del crítico [20].

Las relaciones de las bases intercambiables del suelo se encuentran en un rango alto, lo que limita la adecuada absorción por los cultivos, aunque los niveles de estos elementos se encuentren adecuados [20]. De acuerdo con [23] en los rangos obtenidos para las relaciones Ca/K, Mg/K y Ca+Mg/K el elemento potasio se encuentra deficiente con respecto al calcio y al magnesio, además, de acuerdo con la relación entre Ca/Mg el elemento magnesio se encuentra desbalanceado con respecto al calcio.

El P presenta diferencias significativas (p -valor $\leq 0,05$) entre los tratamientos y en la interacción entre muestreo y profundidad, el SAF supera al monocultivo (Figura 2). En la profundidad de 0 – 20 cm el contenido de P aumentó del año 2019 al 2020 y disminuyó en la profundidad de 20 – 40 cm, este resultado podría explicarse por mayor aporte de materiales orgánicos [24], aunque es muy poco tiempo para esa aseveración. Aun así, el contenido de fósforo (P: 3,03 a 6,53 mg/L) en ambos tratamientos se encuentran por debajo del nivel crítico [20]. Lo que podría afectar las raíces de *E. guineensis*, [25] encontró correlación positiva entre la concentración de fósforo y la densidad radical. En Costa Rica, [26] también reportó bajos contenidos de fósforo, similares a los obtenidos en este estudio, en suelos de sistemas agroforestales con *T. cacao*.

El porcentaje de materia orgánica (MO), de carbono total (C) y nitrógeno total (N) presentaron diferencias significativas para muestreo y para profundidad, por ende, la relación C/N mostró el mismo comportamiento, donde en 0 a 20 cm estas variables fueron superiores que en 20 a 40 cm, igualmente en el segundo año estas variables fueron mayores (Figura 4), lo que concuerda con [6], [9], [27], [28], [29], [30], contrario a lo encontrado por [31] con plantaciones de *C. arábica* y sombrío de especies forestales. La materia orgánica varió entre 2,01% – 4,14% en ambos tratamientos (monocultivo y SAF). Contrario de esta investigación, [26] obtuvo diferencias significativas entre los tratamientos para estas variables, siendo mayor en los sistemas de producción cacao-laurel respecto plátano en monocultivo y sistemas banano-laurel. En cambio, [32] obtuvo contenidos similares tanto en SAF como en monocultivo, igual que estos resultados, pero contrario a lo encontrado por [26], este estudio muestra que, al parecer, falta más tiempo para que los tratamientos muestren sus verdaderos resultados, el tiempo de este estudio fue de dos años; sin embargo, se muestra una tendencia en el contenido de MO, C y N de un año al otro de estudio (Figura 4).

La densidad aparente fue significativamente más alta (p -valor $\leq 0,05$) en el SAF, así mismo, la porosidad fue menor en este tratamiento, para [7], [33] la densidad aparente y la materia orgánica son indicadores de la porosidad, además que esta variable, la aireación y movimiento del agua están asociadas al uso del suelo. Los valores de densidad aparente fueron bajos (0,83 a 0,99 mg/L), a pesar de que los suelos donde están localizadas las parcelas son, principalmente, Inceptisoles (Figura 1), quizás debido a que en el país existe la posibilidad de haber suelos con características ándicas sin ser Andisoles [34]. En Inceptisoles, [26] obtuvo una densidad aparente menor en los sistemas con cacao-laurel y barbecho. Los autores [35] no encontraron diferencias para la variable porosidad total en los suelos de bosque nativo y monocultivos de *T. cacao* y *E. guineensis*, concluyeron que esta variable no es apropiada para determinar los efectos de estos sistemas sobre el suelo.

Conclusión

La diversificación del cultivo de *Elaeis guineensis* en un SAF con *Musa* sp., *Cordia megalantha* y *Theobroma cacao*, después de dos años, no produjo efecto significativo sobre la fertilidad fisicoquímica del suelo en general. Sin embargo, hubo algunas excepciones significativas: el contenido de fósforo fue mayor en el SAF y los porcentajes obtenidos de materia orgánica, N y C total fueron mayores en año 2020 respecto a los del 2019 y en los primeros 20 cm frente a la profundidad de 20 a 40 cm.

Recomendaciones

Continuar con la evaluación de las condiciones del suelo por los siguientes años para obtener una base de datos más sólida sobre los resultados.

Evaluar la fertilidad biológica del suelo, ya que los organismos vivos pueden proveer información de su entorno y evidenciar cambios a corto o mediano plazo en la salud del suelo.

Referencias

- [1] Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. Boletín estadístico agropecuario. 29 ed. S. Mora y Y. Quirós (eds.). MAG, San José, Costa Rica, 2019. [en línea] Disponible: <http://www.mag.go.cr/biblioteca-virtual/BEA-0029.PDF>
- [2] G. Rodríguez. “Análisis del desempeño de la cadena productiva de palma aceitera, 2004-2008”. SEPSA, Costa Rica, 2010. (01 octubre, 2019) [en línea] Disponible en http://www.infoagro.go.cr/Agronegocios/Documents/Cadena_Palma_publicable%2031-03-10.pdf

- [3] M. Román y J. E. Angulo. Panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito: tendencias y desafíos para el desarrollo sostenible. INOGO, Costa Rica, 2013. (01 octubre, 2019) [en línea] Disponible: http://inogo.stanford.edu/sites/default/files/Informe%20econ%C3%B3mico%20INOGO%20Feb%202013_2.pdf
- [4] I. E. Henson. "Impactos ambientales de las plantaciones de palma de aceite en Malasia" (original en inglés). *Revista Palmas* 16, Núm. 4, pp. 49-66. 1995. (20 setiembre, 2019) [en línea]. Disponible: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/490/490>
- [5] F. Farfán. "Agroforestería y sistemas agroforestales con café". Manizales, Caldas, Colombia, FNC – Cenicafe, 2014. (08 setiembre, 2019) [en línea]. Disponible: https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf
- [6] F. Montagnini, E. J. Somarriba, E. Murgueitio, H. Fassola, B. Eibl. "Sistemas agroforestales". Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2015. Informe técnico. Núm. 402. (22 setiembre, 2019) [en línea] Disponible: https://www.researchgate.net/publication/324416322_Sistemas_Agroforestales_Funciones_productivas_socioeconomicas_y_ambientales
- [7] R.M. Murray, M.G. Orozco, A. Hernández, C. Lemus, O. Nájera, "El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo". *Avances en Investigación Agropecuaria*. AIA 18(1), pp. 23-31, 2014.
- [8] M.I. Pavón Rosales, M. E. Domini Cuadra, G.M. Suárez Venero, J. Flores, G. R. Almenares Garlobo, "Sistema Agroforestal para el uso racional del suelo en el municipio San José de las Lajas, provincia Mayabeque", *Cultivos tropicales* vol.35, Núm.2, pp.14-20, 2014.
- [9] R. Quesada. "Los bosques de Costa Rica". Cartago, Costa Rica, ITCR, 2007. (4 octubre, 2019) [en línea]. Disponible: <http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>
- [10] Instituto Meteorológico Nacional. Promedios mensuales de datos climáticos de las estaciones meteorológicas ubicadas en los cantones de Osa y Golfito, Puntarenas, IMN, 2019. San José, Costa Rica.
- [11] Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). "Mapa digital de suelos de Costa Rica", 2020. (25 enero, 2021) [en línea]. Disponible: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139
- [12] J. Di Rienzo, F. Casanoves, M. Balzarini, L. González, M. Tablada, C. Robledo, InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- [13] L. Mack. Evaluación de los sistemas de producción de palma africana (*Elaeis guineensis*) establecidos por el proyecto LAPA en la región de Osa-Golfito, Puntarenas, Costa Rica (en línea). Tesis Lic. Cartago, Costa Rica, TEC. 79 p. Consultado el 01 ago. 2019. Disponible en https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11173/evaluacion_sistema_agroforestal_monocultivo_palma_africana.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [14] J. Núñez, Manejo y conservación de suelos. 1era ed. San José, Costa Rica, EUNED. 288 p. 2010.
- [15] F. Munévar, "Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos". *Palmas* 22, Núm.4, pp. 9-17. 2001.
- [16] N. Durán. Manejo de los suelos y fertilización en palma aceitera. In G. Meléndez, E. Molina (eds.). Memoria. Fertilidad de Suelos y Manejo de la Nutrición de los Cultivos en Costa Rica, 2001. (1 setiembre, 2019) [en línea]. Disponible: <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilidad%20de%20Suelos.pdf>
- [17] M. A. Arvelo, D. González, S. Maroto, T. Delgado y P. Montoya, Manual técnico del cultivo del cacao: Prácticas Latinoamericanas. IICA. San José, C.R. 2017.
- [18] J. Núñez, Fundamentos de Edafología. 2da ed. San José, Costa Rica, EUNED, 188 p. 2000.
- [19] J.C. Méndez y F. Bertsch, Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 1era ed. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 103 p. 2012.
- [20] D. Moreira y C. Castro. Sistemas agroforestales. Adaptación y mitigación en la producción de banano y cacao. Proyecto Euroclima-IIICA/Un día en la finca. Costa Rica. 2017, pp 1-12. (11 octubre, 2021) [en línea]. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=iPTFAqd2xro&feature=youtu.be&list=PLQM0b7UDnH_RHBQ0YIXWDPNPru6VCzOGU
- [21] N. Durán, R. Salas, C. Chinchilla, F. Peralta, "Manejo de la nutrición y fertilización en palma aceitera en Costa Rica", presentado a XI Congreso Nacional Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos. San José, Costa Rica, 1999.
- [22] J.C. Méndez, "Estudio de la fertilidad de los suelos de Costa Rica con base en los registros de los análisis del Laboratorio de Suelos y Foliar del CIA/UCR durante el período 2006-2010". Tesis Lic. UCR, San José, Costa Rica, 2012.

- [23] V. H. Ramírez-Builes, "Los sistemas agroforestales en el trópico y la fertilidad del suelo". *Investigaciones de Unisarc*, 5 Núm. 2, pp. 11-21, 2007.
- [24] J. A. Cristancho, F. Munévar, A. Acosta, L. Santacruz, M. Torres, "Relación de las características edáficas y el desarrollo del sistema de raíces de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq)". *Palmas* 28, Núm.1, pp. 21-29, 2007.
- [25] R. H. Cerda. "Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*) en el valle de Talamanca", Tesis M. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 2008. (23 octubre, 2019). [en línea]. Disponible: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A1822E/A1822E.PDF>
- [26] M. Ibrahim, D. Pezo. "Interacciones en sistemas silvopastoriles". In *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica. Manual Técnico no 109*. Editores: G. Detlefsen y E. Somarriba. CATIE, Turrialba, Costa Rica, pp. 69-90, 2012. (01 setiembre, 2020) [en línea] Disponible:http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3512/Produccion_de_madera_en_sistemas_agroforestales.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [27] Oficina Nacional Forestal, Costa Rica. *Guía Técnica para la implementación de Sistemas Agroforestales (SAF) con árboles forestales maderables*. Heredia, Costa Rica. 30 p. 2013.
- [28] F. Casanova-Lugo, L. Ramírez-Avilés, D. Parsons, A. Caamal-Maldonado, A. Piñeiro-Vázquez, V. Díaz-Echeverría, "Environmental services from tropical agroforestry systems". *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22, Núm.3, pp. 269-284, 2016.
- [29] M. Corella, "Agroforestería y biodiversidad: la importancia de los sistemas agroforestales en la conservación de especies". *Biocenosis* 30, Núm.1-2, pp.59-62, 2016.
- [30] F. Farfán, "Cambios en la fertilidad del suelo con plantaciones de café y sombrío de especies forestales". *Cenicafé* 61, Núm.1, pp. 7 – 27. 2010.
- [31] A. C. Rodríguez, D. Cristóbal, E. Álvarez, M. Uribe. "Indicadores de calidad de un suelo para la producción de maíz bajo sistemas agroforestal y monocultivo". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Num. 16, pp.3263-3275, 2016. (08 enero, 2021) [en línea] Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe16/2007-0934-remexca-7-spe16-3263.pdf>
- [32] J. L. González-Barrios, G. González-Cervantes, E. Chávez-Ramírez, "Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenta alta del Río Nazas". *Tecnología y ciencias del agua*. Enero-marzo Vol.3, Núm.1-2 a 2, pp. 21-32, 2012.
- [33] A. Alvarado, W. Forsythe, "Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica". *Agronomía Costarricense* 29, Núm.1, pp.85-94, 2005.
- [34] I. D. Novillo, M.D. Carrillo, J.E. Cargua, V. Nabel, K. E. Albán, F. L. Morales, "Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos", Ecuador. *Temas Agrarios* 23(2), pp.177-187, 2018.

Primer informe sobre presencia de yemas cotiledonares en plántulas de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey]

First report on presence of cotyledonous buds in tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] seedlings

José Eladio Monge-Pérez¹, Michelle Loría-Coto²

Fecha de recepción: 18 de enero, 2022

Fecha de aprobación: 29 de abril, 2022

Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Primer informe sobre presencia de yemas cotiledonares en plántulas de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey]. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 32-36.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5999>

1 Máster en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Investigador de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: jose.mongeperez@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>

2 Máster en Administración Educativa, Investigadora de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Correo electrónico: michelle_loria@yahoo.com

 <https://orcid.org/0000-0003-0456-2230>

Palabras clave

Ontogenia; brote; tallo; cotiledón.

Resumen

El objetivo fue realizar observaciones sobre el desarrollo morfológico de las plántulas de tacaco (*Sechium tacaco*). Se sembraron 50 semillas de tacaco, y se evaluó el desarrollo de las plántulas. A los 30 días de la emergencia de las plántulas, en dos de ellas se encontró que, luego de la muerte del tallo principal, se produjo la emergencia de un nuevo tallo desde el interior de la cubierta seminal, a partir de las yemas cotiledonares. En la presente investigación se informa por primera vez sobre la existencia de yemas cotiledonares en tacaco, lo que representa un hallazgo científico en esta especie.

Keywords

Ontogeny; sprout; stem; cotyledon.

Abstract

The objective was to make observations on the morphological development of the tacaco (*Sechium tacaco*) seedlings. 50 tacaco seeds were sown, and the development of the seedlings was evaluated. 30 days after the emergence of the seedlings, in two of them it was found that, after the death of the main stem, a new stem emerged from the interior of the seed coat, from the cotyledonous buds. This is the first notice about the existence of cotyledonous buds in tacaco; this is a significant scientific event for this species.

Introducción

El tacaco, [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], es una especie vegetal de la familia Cucurbitaceae que presenta una planta herbácea, trepadora, anual y monoica; sus frutos se consumen como alimento [1]. Es una especie endémica de Costa Rica [2] [3], y se sugiere que debe ser considerada como patrimonio natural de este país [1].

El cultivo del tacaco se practica preferentemente en zonas con altitudes entre 500 y 1800 msnm, y se puede realizar prácticamente en cualquier época del año [1] [4] [5]. Recientemente se estimó la distribución potencial de esta especie en Costa Rica [6].

Los cotiledones son las hojas embrionales o primeras hojas de la planta; la condición más común es la dicotilia (plántulas con dos cotiledones), presente en las plantas dicotiledóneas [7], como es el caso del tacaco.

En 1994 se realizó una descripción morfológica de los órganos vegetativos y reproductivos de *Sechium tacaco*, y se determinó que la germinación es endocárpica (se lleva a cabo dentro del fruto) y criptocotilar (los cotiledones permanecen dentro de la cubierta seminal) [8]. Sin embargo, en esa investigación no se informó nada sobre la presencia o ausencia de yemas cotiledonares en esta especie.

El objetivo de este trabajo fue realizar observaciones en el desarrollo morfológico de las plántulas de tacaco.

Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en Ochomogo de Cartago (9° 54' 20,073" latitud Norte y 83° 56' 2,418" longitud Oeste), a una altitud de 1716 msnm, entre abril y julio de 2021. Se colectaron 50 frutos de tacaco, de una finca productora de esta hortaliza, ubicada en la zona de El Yas, Paraíso, Cartago. Los frutos se pusieron a secar a la sombra, durante 60 días, con el fin de que los frutos se deshidrataran; posteriormente, se realizó la extracción de las semillas del fruto, en forma manual. Se sembraron las 50 semillas de tacaco, en macetas plásticas de 15 cm de diámetro y 15 cm de altura, rellenas con sustrato de tierra mezclada con fibra de coco, en una proporción 50:50. Luego de 40 días, varias de las semillas germinaron y produjeron cinco plántulas, sobre las cuales se realizaron observaciones durante su crecimiento, a lo largo de 60 días, con respecto a la forma de sus hojas y tallo.

Resultados y discusión

Generalmente, toda plántula de tacaco consta de un solo tallo, pero después de que éste alcanza cierta longitud (un metro o más), se pueden presentar ramas secundarias; esto sucedió en tres de las cinco plántulas de tacaco estudiadas. Esto ilustra la fuerte dominancia apical en esta especie en la fase inicial de desarrollo de la plántula.

Sin embargo, a los 30 días de la emergencia de las plántulas, en dos de ellas se encontró que, a partir de la muerte del tallo principal, luego de varios días se produjo la emergencia de un nuevo tallo a partir del interior de la cubierta seminal (figuras 1 y 2), lo que representa una prueba fehaciente de la presencia de yemas cotiledonares en el tacaco, dada la germinación tipo criptocotilar en esta especie. Sin embargo, debido a la fuerte dominancia apical en esta especie, en condiciones normales dichas yemas cotiledonares normalmente no se desarrollan, excepto en el caso de una muerte prematura del tallo principal, como fue el caso en estas dos plántulas, en las que dicho tallo se secó, lo que provocó la emergencia de un nuevo tallo, a partir de una de las yemas cotiledonares. En ambas figuras se observan los dos tallos, uno de ellos emergió primero pero se secó, lo que provocó la brotación de un nuevo tallo a partir de una yema cotiledonar.



Figura 1. Plántula de tacaco.



Figura 2. Plántula de tacaco.

La presencia o no de yemas cotiledonares es una característica genética de cada especie de planta. Una investigadora informó que no todas las especies de plantas dicotiledóneas tienen yemas axilares cotiledonares; en el caso de las especies *Sebastiania brasiliensis* y *Sapium haematospermum*, ambas de la familia Euphorbiaceae, la primera sí tiene yemas axilares cotiledonares, pero la segunda no [9].

En otra investigación se indicó que en la especie *Gymnocladus dioica*, de la familia Fabaceae, subfamilia Caesalpinioideae, las yemas axilares cotiledonares no se desarrollan bajo condiciones normales; pero que cuando se decapita la plántula, el par superior de primordios de yemas laterales empieza su desarrollo, pero después de dos semanas, una yema restablece la dominancia apical [10]. Esto mismo sucedió en las plántulas de tacaco en el presente trabajo. En muchas especies, las yemas en la axila de los cotiledones pueden desarrollarse y asumir la dominancia apical si el epicotilo es dañado por herbivoría u otro factor [7].

En otro estudio se observó dos yemas cotiledonares en *Cassia aphylla* subsp. *aphylla* (familia Fabaceae, subfamilia Caesalpinioideae); esas yemas generalmente no se desarrollaban enseguida, pero sí pueden hacerlo si accidentalmente muere el ápice de la plántula [11].

Varios investigadores encontraron en la planta de la familia Fabaceae, *Adesmia bicolor*, que esta especie posee dos yemas cotiledonares, las cuales se empiezan a desarrollar a los 37 días después de la germinación, y que las ramas cotiledonares crecieron más rápido que el eje principal de la planta; en ese caso, la dominancia apical es débil [12].

Otros autores, al estudiar un tipo de frijol, *Phaseolus vulgaris* var. *aborigineus* (Fabaceae), encontraron que al morir el ápice en la zona del epicotilo, surgieron yemas en el nudo cotiledonar, que continuaron el crecimiento; cuando las yemas cotiledonares retomaban el crecimiento, una de ellas se desarrollaba más que la otra, adquiriendo la dominancia apical [13]. Este mismo fenómeno se evidenció en este trabajo con las plántulas de tacaco.

De acuerdo a la metodología desarrollada, en que se colectaron frutos de tacaco, se dejaron deshidratar, se les extrajo la semilla, y estas se pusieron a germinar para observar el crecimiento de las plántulas, se concluye que, de las cinco plántulas que germinaron, en tres de ellas únicamente se desarrolló un tallo, pero en dos de ellas se presentó el crecimiento de dos tallos, en las que el segundo tallo se desarrolló luego de la muerte del tallo principal, lo que evidencia la presencia de yemas cotiledonares en tacaco.

Según la revisión de literatura realizada, se concluye que ningún investigador había informado anteriormente sobre la existencia de yemas cotiledonares en tacaco, lo que constituye un hallazgo de importancia científica en esta especie.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica para la realización de este trabajo, así como de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al inglés.

Referencias

- [1] J. E. Monge-Pérez and M. Loría-Coto, "Caracterización de frutos de cinco genotipos de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] en Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 30, no. 3, pp. 71-84, 2017.
- [2] R. Lira-Saade, *Estudios taxonómicos y ecogeográficos de las Cucurbitaceae latinoamericanas de importancia económica*, Roma, Italia: International Plant Genetic Resources Institute, 1995.
- [3] J. León, *Botánica de los cultivos tropicales*, San José, Costa Rica: IICA, 1987.
- [4] J. E. Monge-Pérez and M. Loría-Coto, "Cuantificación de la variabilidad entre progenies de tacaco (*Sechium tacaco*)," *Revista Pensamiento Actual*, vol. 18, no. 30, pp. 67-77, 2018.
- [5] J. E. Monge-Pérez and M. Loría-Coto, "Variabilidad morfológica en frutos de una población de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] a través del tiempo," *Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 4, pp. 15-24, 2018.
- [6] L. A. Barrera-Guzmán, J. Cadena-Iñiguez, J. P. Legaria-Solano, G. Ramírez-Ojeda, J. Sahagún-Castellanos and M. L. Arévalo-Galarza, "Potential distribution models of *Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey in Costa Rica," *Agro Productividad*, vol. 14, 2021.
- [7] E. Flores, *La planta: estructura y función*, Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2013, p. 884.
- [8] J. Morales, "Morfología general del tacaco, *Sechium tacaco* (Cucurbitaceae)," *Revista de Biología Tropical*, vol. 42, no. 1-2, pp. 59-71, 1994.
- [9] M. C. Franceschini, "Morfología de embriones y plántulas de especies leñosas del nordeste argentino," *Bonplandia*, vol. 10, no. 1-4, pp. 143-154, 2000.
- [10] J. I. Santa, "Anatomía del embrión y del vástago de la plántula de *Gymnocladus dioica* (L.) Koch," *Actualidades Biológicas*, vol. 6, no. 22, pp. 87-99, 1977.
- [11] L. D. Bravo, "Estudio comparativo de las plántulas de las subespecies de *Cassia aphylla* Cav.," *Darwiniana*, vol. 21, no. 2-4, pp. 393-399, 1978.
- [12] V. Pérez, M. Panzitta, C. Vidal, S. Basconsuelo, J. Gorjon, D. Fitzimons, R. Malpassi and L. Bianco, "Ritmo de crecimiento, producción de biomasa y dinámica de movilización de carbohidratos en un cultivo de *Adesmia bicolor* (Poir.) DC (Fabaceae)," *Chilean Journal of Agricultural & Animal Science*, vol. 36, no. 3, pp. 171-180, 2020.
- [13] P. S. Hoc, S. M. Espert, S. I. Drewes and A. D. Burghardt, "Polimorfismo en *Phaseolus vulgaris* var. aborigineus (Fabaceae). Evidencias que indican hibridación natural," *Revista de Biología Tropical*, vol. 51, no. 3-4, pp. 725-736, 2003.

Análisis hidrológico e hidrodinámico del Monumento Nacional Guayabo y su impacto frente al cambio climático

Hydrological and hydrodynamic analysis of the Guayabo National Monument and its impact due to climate change

Daphne María Zamora-Varela¹, David Borge-Leandro²

Fecha de recepción: 25 de enero, 2022
Fecha de aprobación: 2 de mayo, 2022

Zamora-Varela, D.M; Borge-Leandro, D. Análisis hidrológico e hidrodinámico del monumento nacional guayabo y su impacto frente al cambio climático. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 37-49.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5925>

-
- 1 Universidad Fidélitas, Costa Rica.
Correo electrónico: zamoradaphne18@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-8577-9639>
 - 2 Universidad Fidélitas, Costa Rica.
Correo electrónico: dborge80034@ufide.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9157-8438>

Palabras clave

Hidrología; hidrodinámica; tecnología LiDar; hidrograma; hietograma; calado; anegamiento.

Resumen

En Costa Rica existe un patrimonio y un legado de la Ingeniería Civil, en la provincia de Cartago: Monumento Nacional Guayabo es un sitio con zonas arqueológicas de más de 1000 años d.C. Hoy en día se han presentado distintos problemas de erosión y anegamiento en el sitio que amenaza con el deterioro de la infraestructura.

La importancia de la investigación se centraliza en un análisis de la situación actual y futura de la escorrentía y como esta puede ver afectada por el cambio climático, además de una propuesta de solución basada en una zanja de infiltración.

Los datos hidrodinámicos se obtuvieron de una tormenta de 30 min, con un periodo de retorno de 50 años con un incremento en la lluvia de un 18% por el cambio climático, donde se estudian las variables de velocidad y calado de la escorrentía. Los valores críticos obtenidos son de 1,43 m/s y 0,47 m respectivamente. El hidrograma crítico correspondiente al escenario con un periodo de retorno de 50 años y un incremento del 18%, muestra un caudal de 0,65 m³/s y el hietograma en el mismo escenario muestra una cantidad de precipitación de 19 mm.

Dicho esto, se propone como solución una zanja de infiltración con GeoPockets para acumular la escorrentía superficial, la cual ayuda a disminuir el anegamiento y detiene la erosión.

Con la solución propuesta se lograría liberar la zona del monumento de la escorrentía superficial sin secar el sistema hidráulico ni los canales del Monumento Nacional Guayabo.

Keywords

Hydrology; hydrodynamics; Lidar technology; hydrograph; hietogram; draft; waterlogging.

Abstract

In Costa Rica there is a Civil Engineering heritage and a legacy, in the province of Cartago: Guayabo National Monument is a site with archaeological sites dating back more than 1400 years AD. Today there have been different problems of erosion and waterlogging at the site that threaten to deteriorate of infrastructure.

The importance of the research focuses on an analysis of the current and future runoff and how it may be affected by climate change, and how the issue can be solved by means of an infiltration ditch.

The hydrodynamic data was obtained from a 30-minute storm, with a return period of 50 years with an increase in rainfall of 18% due to climate change, where the variables of runoff speed and draft are studied. The critical values obtained are 1.43 m / s and 0.47 m respectively. The critical hydrograph corresponding to the scenario with a return period of 50 years and an increase of 18%, suggests a flow of 0.65 m³ / s and the hietograph under the same scenario shows a precipitation amount of 19 mm.

An infiltration ditch with GeoPockets is proposed as a solution to accumulate surface runoff, which helps reduce waterlogging and stops erosion.

With the proposed solution, it is possible to free monument area from surface runoff without drying up the hydraulic system or the channels of the Guayabo National Monument.

Introducción

El Monumento Nacional Guayabo se ubica en la provincia de Cartago, Costa Rica; dentro del cantón de Turrialba, en el distrito de Santa Teresita, el mismo cuenta con zonas arqueológicas que datan entre 1000 años d.C. y 1400 a.C. El sitio arqueológico con más de tres mil años de antigüedad es considerado la ciudad más antigua en el país. De acuerdo con [1] el monumento fue fundado en el año 1000 a.C. y abandonado en el año 1400 d.C. y descubierto hace 50 años por el arqueólogo Carlos Aguilar Piedra.

La investigación realizada por José Ricardo Bonilla Brenes en el año 2014 [2] sobre un análisis de las estructuras hidráulicas del Monumento Nacional Guayabo, muestra un modelo del funcionamiento de las estructuras hidráulicas de una manera geométrica, dando a conocer sus dimensiones, pendientes, capacidades y conexiones de cada una de las estructuras hidráulica que se encuentran visibles en el parque, además de cómo estas se interconectan y brinda acceso a una mejor comprensión de los trayectos del agua.

Existen distintos hallazgos arqueológicos que se han dado gracias a las nuevas tecnologías de geoposicionamiento espacial, entre las más destacables está la herramienta LiDar, es un método que se desarrolló con mayor profundidad en los 2000, sin embargo, existen documentaciones desde 1971, la herramienta permite digitalizar relieves, que mediante un láser permite detectar y medir la distancia entre dicho instrumento y la superficie.

El estudio se centraliza en el sistema hidráulico del monumento en el cual existe una zona denominada “núcleo arquitectónico” el cual se refiere según [3] a un conjunto de estructuras de distinta índole y características que les permitieron a los pobladores el manejo del agua para su total aprovechamiento.

La investigación se centraliza en el desarrollo que toma la esorrentía en las construcciones hidráulicas. Se cree que los fuertes cambios climáticos que ha sufrido el país afectan rotundamente el funcionamiento de estas estructuras. La investigación busca satisfacer una solución a las grandes intensidades de lluvia que existen en el país.

La solución propuesta está fundada en el concepto SbN (Solución basada en la Naturaleza)

El termino SbN yace en la década de los 2000 por la UICN y el Banco Mundial [4], por la búsqueda de abordar los desafíos actuales desde una perspectiva más natural, convirtiéndolas a la vez en oportunidades de innovación y lazos entre la naturaleza, comunidad, infraestructural, cultura y economía.

Análisis metodológico

La investigación se clasifica como un estudio exploratorio, ya que el objetivo pretende alcanzar un modelo hidráulico e hidrodinámico del Monumento Nacional Guayabo mediante la recolección de datos geospaciales por medio de tecnología LiDar terrestre y aérea. La recolección de datos se realiza de una forma cuantitativa, mediante la observación, recopilación y obtención de las distintas variables de la esorrentía de la zona en estudio, para ello se trabajó con tecnología RTK donde se usa una triangulación con dos estaciones, una en tierra y la otra en aire para aumentar la precisión de los equipos, los grupos siempre están en comunicación para que la información obtenida por ambos equipos se esté guardando simultáneamente, se vayan tomando los datos de la superficie, obteniendo una nube de puntos de 3 dimensiones del sitio valorado.

Los datos obtenidos en campo se procesarán y analizarán en los sistemas de información geográfica para modelar los escenarios de los cambios de esorrentía superficial en la zona. Entre las herramientas por utilizar se tienen: Global Mapper, Google Earth, QGis, IBER para

generar histogramas, gráficos y cuadros comparativos para los distintos periodos de retorno y cambios frente al cambio climático, donde se modela la información obtenida para procesar situaciones de crecida de lluvias en velocidad y en altura para un periodo de retorno de 50 años con una intensidad de lluvia 30 minutos. Estos escenarios brindan la situación en la que se enfrenta el monumento Nacional Guayabo y determinan el principal impacto de la zona. Para finalizar se presenta el planteamiento de la solución que vaya acorde con la infraestructura de la zona.

Resultados

El modelo permitió realizar simulaciones para cuantificar la variación temporal de la información hidrológica del sitio arqueológico.

Para el cálculo de la intensidad de lluvia de toma la fórmula del modelo propuesto por [5], tomando el dato de intensidad correspondiente a la provincia de Cartago:

$$I_{cartago} = 156,89 - (28,6 * \ln(dur)) + (42,2 - (8,07 * \ln(dur))) * \ln tn \quad \text{Ec 1}$$

donde:

I = Intensidad de lluvia en mm/h

tn = Periodo de retorno correspondiente en años

dur = Duración de la lluvia en minutos (30 min).

Con la intensidad de lluvia del cuadro 1 se generó un hidrograma (ver figura 1) con periodo de retorno de 50 años y dentro del mismo una comparación con un incremento del 18% en la intensidad de lluvia debido al cambio climático [6].

Para el hidrograma se procede a calcular las siguientes variables:

Intensidad de lluvia:

$$I = 156,89 - (28,46 * \ln(30)) + (42,2 - 8,07 * \ln(30)) * \ln(50)$$

$$I = 118 \text{ mm/h}$$

Precipitación:

$$P = (I * dur)/60 \quad \text{Ec 2}$$

$$P = (118 * 30)/60$$

$$P = 58,90 \text{ mm}$$

Con los resultados obtenidos y los datos de entrada del sitio arqueológico se calculan las siguientes variables:

$$\text{Pendiente: } S = (cota \text{ max} - cata \text{ min}) / (Long \text{ cauce} * 1000) \quad \text{Ec 3}$$

$$\text{T concentración (h): } 0,000325 * (((Long \text{ cauce} * 1000)^{0,77} / (Pendiente)^{0,385}) \quad \text{Ec 4}$$

$$\text{T concentración (min): } t \text{ concentración (h)} / 60$$

$$\text{Tiempo punta (h): } \sqrt{t \text{ concentración (h)}} + 0,6 * t \text{ concentración (h)} \quad \text{Ec 5}$$

Tiempo base (h): $2,67 * tiempo\ punta$ Ec 6

Caudal de la punta (m³/s): $0,208 * ((Precipitación * Superficie)/tiempo\ punta)$ Ec 7

Duración P neta (h): $2 * \sqrt{t\ concentración\ (h)}$ Ec 8

Cuadro 1. Datos y cálculo hidrograma T= 50 años

Datos de Entrada	
Long cauce (km)	0,36
Cota máx. (m)	1122
Cota min (m)	1100
Superficie (km ²)	0,02
Precipitación (mm)	58,90

Cálculos	
Pendiente	0,061
t concentración (h)	0,089
t concentración (min)	5,31
tiempo punta (h)	0,35
tiempo base (h)	0,9
Caudal de la punta (m ³ /s)	0,5
Duración P neta (h)	0,595

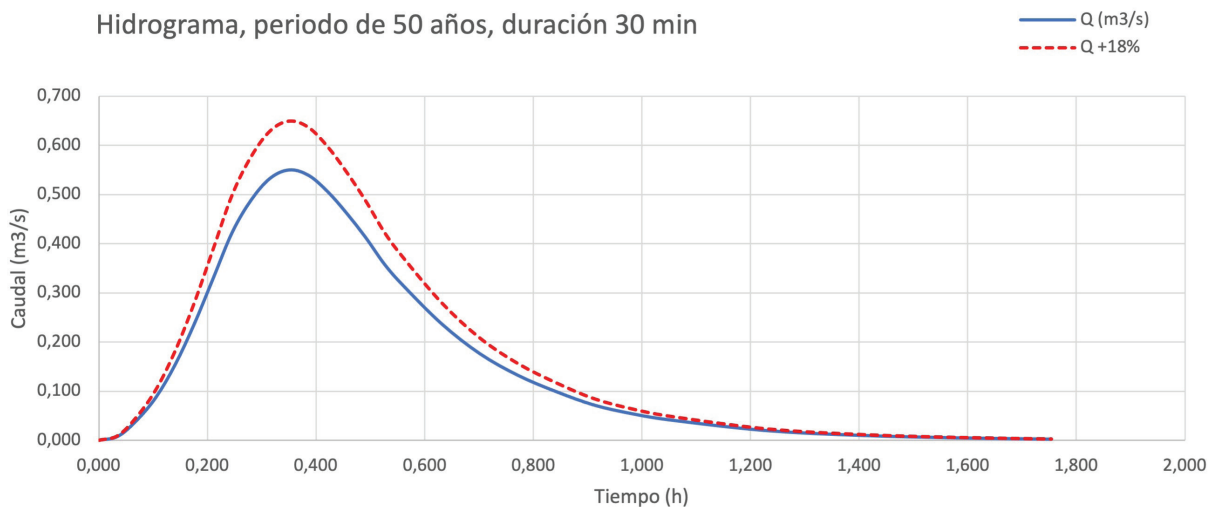


Figura 1. Hidrograma T= 50 años.

Se generan los hietogramas para representar las variaciones en el tiempo de la precipitación, como se muestra en los cuadros 2 y 3.

Los datos de intensidad de precipitación de toman de [7], específicamente de la estación meteorológica de Pacayas en Cartago durante el periodo de 1980-2006.

Cuadro 2. Precipitación, periodo de retorno T= 50 años.

Hietograma T 50				
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación incremental (mm)	Precipitación incremental ordenada (mm)
5	191.99	16.00	16.00	0.08
10	148.96	24.83	8.83	1.78
15	137.17	34.29	9.47	3.47
20	123.98	41.33	7.03	5.17
25	110.78	46.16	4.83	4.83
30	97.59	48.80	2.64	9.47
35	92.51	53.96	5.17	16.00
40	87.42	58.28	4.32	8.83
45	82.34	61.75	3.47	7.03
50	77.25	64.38	2.62	2.64
55	72.17	66.15	1.78	4.32
60	67.08	67.08	0.93	2.62
65	62.00	67.16	0.08	0.93

Cuadro 3. Precipitación, periodo de retorno T = 50 años + 18%.

Hietograma T 50 + 18%				
Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación incremental (mm)	Precipitación incremental ordenada (mm)
5	226.55	18.88	18.88	-0.10
10	175.77	29.30	10.42	2.10
15	161.86	40.47	11.17	4.10
20	146.29	48.76	8.30	6.10
25	130.72	54.47	5.70	5.70
30	115.16	57.58	3.11	11.17
35	109.16	63.67	6.10	18.88
40	103.16	68.77	5.10	10.42
45	97.16	72.87	4.10	8.30
50	91.16	75.96	3.10	3.11
55	85.15	78.06	2.10	5.10
60	79.15	79.15	1.10	3.10
65	73.15	79.25	0.10	1.10

Se realizó un cálculo del volumen de vacíos dentro de la zanja en donde el volumen sólido de la zanja de infiltración propuesta se obtiene de la siguiente manera:

$$V_S = \text{Ancho} \times \text{Altura} \times \text{Largo} \quad \text{Ec 9}$$

$$V_S = 2 \times 1 \times 400$$

$$V_S = 800 \text{ m}^3$$

La relación de vacíos se estimó según [8]:

$$0,35 = \frac{V_v}{800} \quad \text{Ec 10}$$

Posteriormente se calculó el volumen máximo de precipitación en T=50 años más 18% según se indica a continuación:

$$V_T = \text{Caudal (m}^3/\text{s)} \times \text{tiempo (s)} \quad \text{Ec 11}$$

$$V_T = 0,65 \times 1263,18$$

$$V_T = 819,7 \text{ m}^3$$

Por último, se le resta el volumen de vacíos para obtener el volumen real con el que trabaja la solución propuesta como zanja de infiltración. El cálculo se muestra a continuación:

$$V_R = V_T - V_v \quad \text{Ec 12}$$

$$V_R = 819,7 - 280$$

$$V_R = 539,7 \text{ m}^3$$

En el punto más crítico de la tormenta dentro de la zanja se infiltra, evapora y transcurre aproximadamente un volumen de agua de 539,7 m³ a lo largo de la misma.

Con los datos de caudal se corrieron los modelos hidrodinámicos. El caso crítico del calado es de 0,47 m y la velocidad de 1,43 m/s

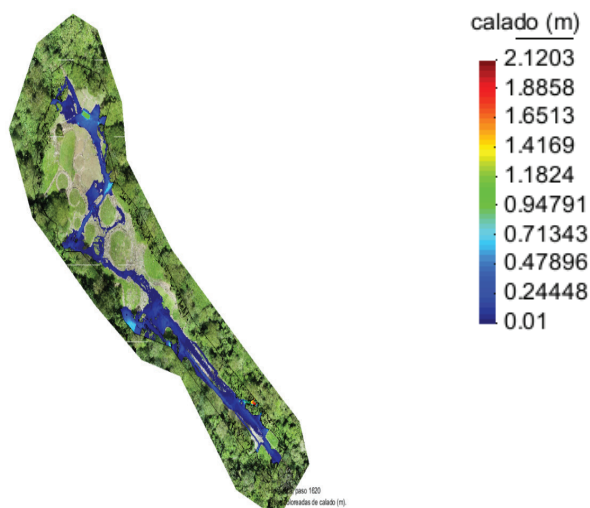


Figura 2. Calado con hidrograma T 50 +18%, sitio arqueológico.

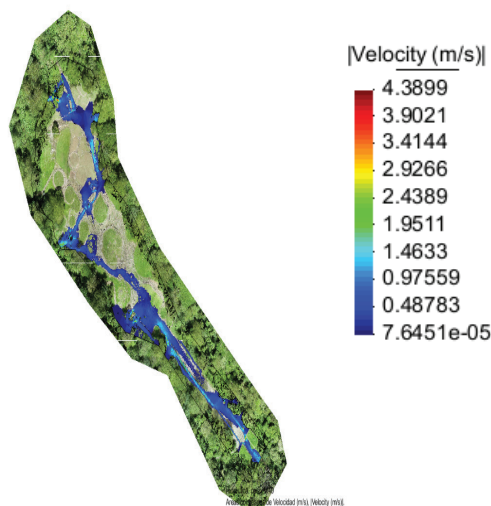


Figura 3. Velocidad con hidrograma T 50 +18%, sitio arqueológico.

Propuesta de solución

El objetivo de la solución es disminuir la cantidad y velocidad de escorrentía superficial en el sitio mediante un sistema de zanjas de infiltración aguas arriba del monumento (ver figura 5), esto para evitar interponerse con la antropología del monumento. Las cuales funcionan como una trinchera perpendicular al sitio arqueológico donde la escorrentía tiene tres distintos destinos: evo transpiración, conducción a la quebrada y filtración

De acuerdo con los lineamientos del SINAC y la administración del Monumento Nacional Guayabo, no existe ningún formulario necesario para realizar ningún tipo de intervención del Monumento. Es necesario que la solución propuesta sea aprobada por el Colegio de Arqueología y que la misma tenga antecedentes de su funcionalidad y eficiencia en otro proyecto ya sea Nacional o Internacional relacionado con el tema, para su aprobación y realización, ya que esta es una solución invasiva al terreno.

La zanja está conformada por sistema llamado “GeoPockets” o Hongxiang Geocell el cual consiste en una red diseñada y de alta resistencia de celdas interconectadas que confina y estabiliza los suelos. El sistema proporciona una solución innovadora a los problemas de estabilidad del suelo en aplicaciones de protección de taludes y canales, soporte de carga y retención de tierra. Una vez instalado el sistema, se utilizan materiales de relleno específicos para rellenar las celdas y crear un sistema de protección y estabilización fuerte y permanente [9].

Diseño zanja de infiltración

La zanja se encuentra en el lado oeste y a todo el largo del sitio arqueológico, como se puede apreciar en la figura 4.



Figura 4. Diagrama flujo del agua.

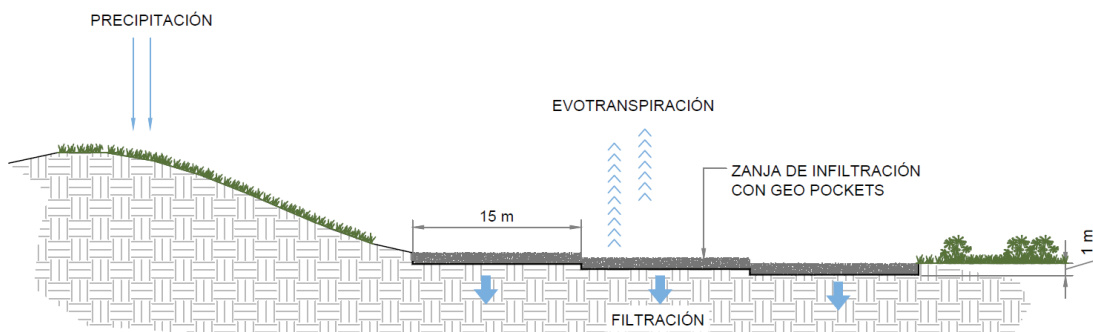


Figura 5. Diseño zanja de infiltración.

A lo largo de la zanja se coloca una red que permite la permeabilización [10], existe una pendiente natural de terreno por lo que en el diseño se incluyó cada 15 m un cambio de altura de entre 20 y 50 cm. La zanja tiene dos metros de ancho y un metro de altura, esto asegurara la mayor captación de agua en el caso más crítico. La solución no pretende secar los sistemas hidráulicos del Monumento ni impedir su funcionalidad, solamente es un conducto para la escorrentía superficial en el caso de tormentas muy severas y que la misma no erosione ni dañe gravemente la infraestructura del sitio.

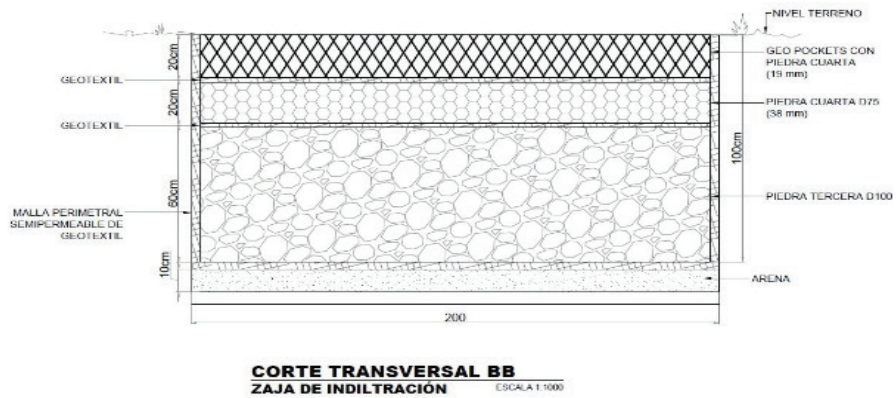


Figura 6. Diseño de zanja.

Una vez colocado en el modelo hidrodinámico la zanja de infiltración se obtuvo un dato de cala de 0,5 m y 0,88 m/s de velocidad, como se aprecia en las figuras 7 y 8.

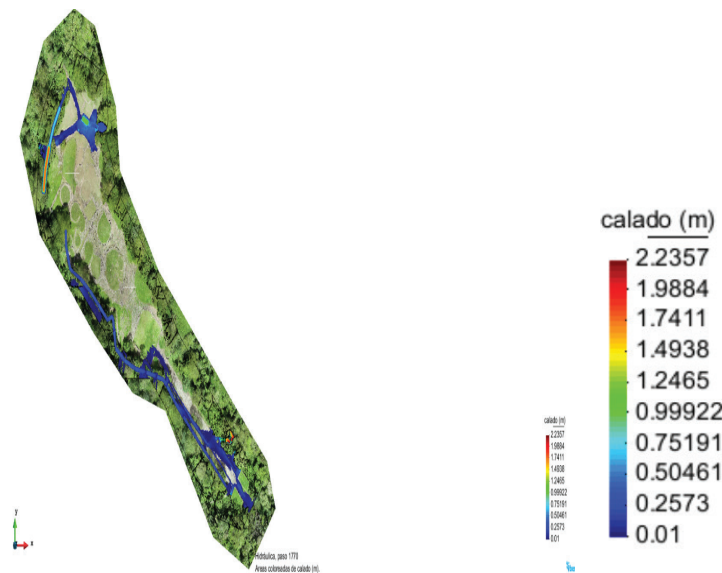


Figura 7. Calado con zanja de infiltración con T= 50 años +18%.

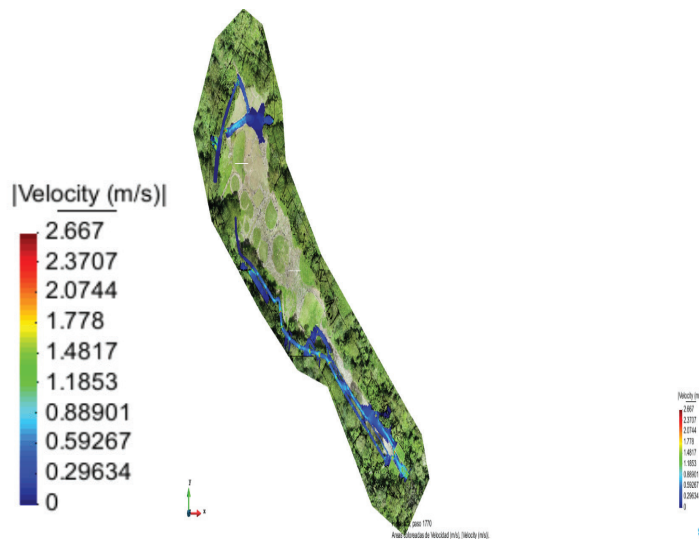


Figura 8. Velocidad con zanja de infiltración con T=50 años +18%.

Se puede observar que efectivamente la escorrentía se redirige a la nueva zanja de infiltración que se colocó en la parte oeste del sitio arqueológico.

Es importante recalcar que la altura de la escorrentía superficial sigue siendo igual de elevada que sin la zanja, esto porque el agua se acumula en ella. Sin embargo, en la mayoría del área esta no se desborda y se mantiene en la zanja de infiltración. La zona de los montículos está completamente resguardada de la escorrentía superficial y logra solucionar el problema de erosión y anegamiento en el área.

De acuerdo SINAC, es muy importante sin importar el tipo de solución otorgada en esta investigación, que el canal existente y el sistema hidráulico no se seque ni deje de funcionar y según los datos obtenidos esto no va a pasar con la zanja de infiltración, ya que como se observa el agua se desborda y sigue su rumbo original en la zona de los tanques de almacenamiento-sedimentación y en el área sur donde están las cunetas al lado de la calzada de piedra.

En el caso de la velocidad existe un cambio entre los datos de la simulación con zanja de infiltración y sin ella, pasa de 1,34 m/s a 0,88 m/s, eliminando el aumento de la erosión en el sitio.

Conclusiones

De acuerdo con los periodos de retorno se puede concluir que el incremento por el cambio climático afecta considerablemente los datos. El valor más crítico de caudal para el periodo de retorno de 50 años con el incremento del 18% es de 0,635 m³/s;

Con la información dictada anteriormente y la simulación de lo que puede provocar una tormenta de estos calibres en el Monumento Nacional Guayabo se pretende alcanzar una solución que redirija la escorrentía superficial de una manera que no se vea afectado grandemente la antropología e ingeniería del sitio arqueológico.

Para ello se propone una solución basada en la naturaleza y con elementos propios del sitio, con la que se pretende prevenir más daño y mantener la infraestructura. La misma se basa en una implementación de una zanja de infiltración de 2 metros de ancho x un metro de profundidad y 400 m de largo, con escalones de 20 cm – 50 cm cada 15 m aproximadamente a todo el alrededor del sitio arqueológico, exactamente al lado oeste, está compuesta por una malla de GeoPockets rellena piedra cuarta y tercera

La zanja de infiltración pretende redirigir la escorrentía superficial, primeramente, mediante la filtración en el suelo, para la cual se realiza un cálculo del volumen de vacíos en la zanja dando como resultado un volumen de 280 m³, esto para trabajar con un dato más concreto a la situación real y un volumen únicamente de sólidos, compuesto de fluidos y relleno.

Se toma el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años + 18%, dando un total de 819,7 m³, y se le resta el volumen de vacíos antes descrito para obtener un resultado total de 624 m³, este sería el valor real de volumen de precipitación para la solución propuesta.

Con dicha solución la escorrentía superficial se acumula en la zanja de infiltración, la zona de los montículos está completamente resguardada y logra solucionar el problema de erosión y riesgos hidrometeorológicos en las áreas verdes y caminos de piedra entre los montículos, áreas más afectadas por la escorrentía superficial.

A pesar de lograr redirigir la escorrentía superficial, es de vital importancia recalcar que los ductos subterráneos, tanque de almacenamiento, de sedimentación y la cuneta a la par de la calzada de piedra, nunca se va a secar y esto se puede asegurar, de acuerdo con los modelos hidrodinámicos, que se va a mantener la corrida de agua, para que el sistema hidráulico original del Monumento siga funcionando y no se seque por motivos de dicha zanja de infiltración colocada como propuesta de solución.

Recomendaciones

Los resultados obtenidos pueden ser más acertados si se incluyesen estudios de suelos y pruebas de laboratorio sobre el terreno en estudio.

Se recomienda, a la administración del Monumento Nacional Guayabo y al Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos CFIA destacar que la solución propuesta es invasiva para el sitio arqueológico y en el caso de ser ejecutada debe ser revisada por más profesionales en el área de suelos, especialmente de existir algún problema del nivel freático, una posible socavación o licuefacción en la zona donde se encuentra la zanja de infiltración.

Se recomienda, a la escuela de Arqueología y a la administración del Monumento Nacional Guayabo realizar un estudio arqueológico en la zona donde se puede realizar la posible zanja de infiltración como solución para la escorrentía superficial, en caso de encontrar hallazgos arqueológicos como en otros lugares del sitio.

Se recomienda, al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) realizar un estudio del presupuesto detallado de ser ejecutada la solución propuesta en este trabajo de investigación.

Se recomienda, a la comunidad de ingeniería civil sobre todo en la realización de obras de tipo hidráulicas siempre tomar en cuenta el incremento del 18% en las intensidades de lluvias por el cambio climático, dado que es una variable de gran relevancia y ciertamente acerca los resultados a un caso más real. En el caso de no ser valorados puede llegar a indicar un factor de riesgo considerable e inducir una falla en la estructura inesperada.

Se recomienda, a la comunidad de ingeniería civil tratar de relacionarse siempre con soluciones o factores sostenibles en los proyectos sobre todo en el caso de ser zonas con un gran valor cultural y natural para el país y también porque el factor de sostenibilidad y construcción amigable con el ambiente en cualquier tipo de infraestructura ayuda enormemente a proteger la biodiversidad y evitar grandes fallos en la zona de construcción.

Referencias

- [1] L.-U. Gabriela Contreras, «Tecnología permite conservar en memoria histórica digital sitio arqueológico,» 29 Abril 2014.
- [2] J. R. B. Brenes, *Análisis de las Estructuras Hidráulicas del Monumento Nacional Guayabo*, San José: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2014.
- [3] M. A. Wong, «Manejo de la fuerza y la velocidad del agua: sector este del sistema hidráulico del sitio arqueológico Monumento Nacional de Turrialba,» 24 Julio 2020. [En línea]. Available: <file:///C:/Users/PROBOOK/Downloads/43376-Texto%20del%20art%C3%ADculo-159894-1-10-20200806.pdf>.
- [4] A. T. Giralda y L. R. M. Andrés F., «Soluciones basadas en la Naturales,» 2018. [En línea]. Available: http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs%202018/10_final.pdf.
- [5] D. W.-G. Vahrson, L. M. A. Sánchez y L. I. A. Beita, *Cálculo de la intensidad de lluvia*.
- [6] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC), «Cambio Climático 2014 informe de síntesis,» 2014. [En línea]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf.
- [7] N. R. Morales, «Curvas de Intensidad duración frecuencia de algunas estaciones meteorológicas mecánicas,» 2011. [En línea].
- [8] D. Escobar, G. a. E. P. y C. Enrique, *Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelos*, Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [9] Geocell, «HDP Geocell,» S.F. [En línea]. Available: http://en.hxgeos.cn/product/141.html?gclid=CjwKCAjw07qDBhBxEiwA6pPbHnW4ht3Fr-i0Bd8U07EiXO5yPHM6L8omNdwLTxr6WOYbqq2s1R287xoCi4UQAvD_BwE.
- [10] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, Ciudad de México: Compañía editorial Ultra, S.A. de C.V, 2000.
- [11] InfraGrass, «InfraGrass,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.infragrass.com/>.
- [12] J. R. B. Brenes, *Análisis de las estructuras hidráulicas del Monumento Nacional Guayabo*, San Jose, 2014.

Simulación del sistema de interconexión eléctrica de los países de América Central usando ETAP



Simulation of the Central American interconnected electrical system using ETAP

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez¹,
Gonzalo Mora-Jiménez², Carlos Meza³

Fecha de recepción: 3 de febrero, 2022
Fecha de aprobación: 17 de mayo, 2022

Gómez-Ramírez, G.A; Mora-Jiménez, G; Meza, C. Simulación del sistema de interconexión eléctrica de los países de América Central usando ETAP. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 50-58.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.6007>

- 1 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>
- 2 Centro Nacional de Control de Energía. Instituto Costarricense de Electricidad, Costa Rica. Correo electrónico: gmoraji@ice.go.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9059-3388>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Anhalt University of Applied Sciences, Germany. Correo electrónico: carlos.meza@hs-anhalt.de
 <https://orcid.org/0000-0002-7374-505X>

Palabras clave

ETAP; simulación de sistemas de potencia; sistemas de potencia; flujos de potencia; análisis computacional del sistema de potencia.

Resumen

El Sistema de Interconexión Eléctrica de los Países de América Central (SIEPAC) ha sido un motor de desarrollo para la región y a partir de su constitución los beneficios han sido cuantiosos mostrando avances socioeconómicos de gran importancia para los habitantes de la zona. El presente artículo muestra un modelado del Sistema Eléctrico Regional (SER) para realizar estudios de flujos de potencia usando el software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program). Hasta donde tienen conocimiento los autores, solo existe un modelo del sistema regional centroamericano usando PSS/E (Power System Simulator for Engineering). En la presente investigación fueron simulados diversos escenarios, con condiciones de operación para distintas y variadas como son lo invierno y verano tanto en carga como generación en estado máximo, medio y mínimo. Se estudia una red de más de 2150 barras que abarca los países de Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá. Comparando los datos obtenidos de flujos de potencia entre ETAP y PSS/E, se obtuvieron resultados satisfactorios pues las variaciones fueron menores al 0.5% de los flujos de potencia entre los países y de esta manera se validaron los resultados de ETAP a las mismas condiciones de análisis. Se concluye que, para fines académicos o de investigación el sistema de potencia de interconexión de Centroamérica, es posible simularlo utilizando la herramienta de ETAP, en sustitución de PSS/E, siendo esta última la utilizada hoy día por los operadores de la red centroamericana.

Keywords

ETAP; power system simulation; power systems; load flow; power systems analysis computing.

Abstract

The Central American Countries Electric Interconnection System (SIEPAC) has been an engine of development for the region. From its establishment the benefits have been substantial, showing socio-economic advances of great importance for the area's inhabitants. This article shows a modeling of the Regional Electric System (SER) to carry out power flow studies using the ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) software. As far as the authors are aware, there is only one model of the Central American regional system using PSS/E (Power System Simulator for Engineering). In this article, various scenarios were simulated and analyzed, varied and different operating conditions such as winter and summer in maximum, medium and minimum load and generation are considered. The power grid studied is more than 2150 bus that covers all the countries: Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica and Panama. Comparing the results of power flows between ETAP and PSS/E, satisfactory results were obtained since the variations were less than 0.5% between the power flows among countries. In this way, the results of ETAP were validated under the same conditions of analysis. As a conclusion, for academic or research purposes, the Central American interconnection power system can be simulated using the ETAP software, instead of PSS/E, which is the one used nowadays by the Central American network operators.

Introducción

La región de Centroamérica tiene una extensión territorial de 522 760 km², una población cercana a los 50 337 000 habitantes y está compuesta por Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá. La región se encuentra interconectada con el Sistema de

Interconexión Eléctrica para los países de América Central (SIEPAC) y se rige por un Mercado Eléctrico Regional (MER) entre los países centroamericanos y México.

SIEPAC fue visualizado por los gobiernos centroamericanos y de España en 1987 con el Plan Puebla-Panamá. Los primeros estudios realizados hasta 1995 demostraron el potencial de oportunidades que tendría la región de llevarse a cabo una integración eléctrica entre los países [1]. En 1996, los gobiernos centroamericanos junto con el de España y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) firmaron el tratado marco para la ejecución del SIEPAC y la formulación del Tratado Marco del Mercado Eléctrico Regional.

A pesar de los progresos que ha tenido la zona existen importantes retos en materia energética derivados de la desigualdad presente entre los países. A pesar de ello, ha habido avances de gran importancia especialmente después de los años noventa [2], [4]. Avances en acceso a la electricidad, utilización de recursos energéticos renovables, pero sobre todo en un aumento de la confiabilidad del sistema regional debido a la interconexión de los países, esto debido a que el contexto sociopolítico de la región ha cambiado profundamente propiciando mejores condiciones políticas para la consolidación del Mercado Eléctrico Regional [1].

La utilización de fuentes renovables en el mercado eléctrico regional ha hecho mostrar avances en temas de descarbonización pues ha habido importantes aportes hacia la no utilización de fuentes no renovables [3], [4]. El cuadro 1 muestra el crecimiento a partir del año 2014 de la integración del recurso renovables en el SER.

Las herramientas de simulación o software son capaces de analizar los distintos estudios del sistema de potencia [17][15] entre los que se pueden mencionar flujos de potencia, cortocircuito, estabilidad, confiabilidad entre otros.

La escogencia de este dependerá del costo y las capacidades que este pueda tener para con el requerimiento solicitado por el usuario. Con respecto a los estudios de flujos de potencia se presentan opciones de acuerdo al método numérico de solución como Gauss-Seidel, Newton-Rapson y Desacoplado-Rápido, no obstante, para estudios de grandes sistemas de potencia los que presentan mejor desempeño de convergencia son el Newton-Rapson y el Desacoplado-Rápido.

Cuadro 1. Capacidad Instalada según fuentes de generación.

Año	Capacidad Instalada MW						
	Hidráulica	Geotérmica	Eólica	Co-Generación	Solar	Biogás	Térmica
2014	5722.9	625.6	589.7	1152.4	8.4	6.4	5358.3
2015	6017.8	625.5	944.4	1412.1	528.3	9	5684.8
2016	6745.1	615	1026.2	1727.7	597.4	17.2	5773.6
2017	6925.8	650	1134.9	1769.8	815.5	20.9	5634.9
2018	7061.8	650	1196.4	1807.3	978.2	20.9	6284.9
2019	7196	706.5	1209.5	1844.8	1227.9	20.9	6167.81

Fuente: basado en [5]

Aplicaciones en redes eléctricas han sido la de Kumar et Al. [16] donde hace una comparación de herramientas de simulación a sistemas de potencia de prueba como lo son IEEE-9 y IEEE-14 barras. Utiliza cuatro softwares de simulación y evalúa los porcentajes de diferencias entre cada uno de ellos. Las diferencias máximas registradas fueron de 7.17% (IEEE-9) y 2.23% (IEEE-14).

Por otro lado, Hutcheon and Bialek [18] validan el modelo de flujos de potencia para el sistema continental europeo. Los resultados son satisfactorios y muestran una correlación del 95% en comparación con los flujos transfronterizos publicados a partir de 2009. El sistema simulado es de 1494 barras para un escenario de invierno. Ambos sistemas modelados [16],[18] se muestran diferencias sustanciales debido al número de barras modelado.

Este artículo muestra la simulación del SIEPAC usando ETAP. En esta se simula un estudio de flujos de potencia donde se incluyen los generadores, líneas de transmisión, transformadores, compensadores de potencia reactiva y cargas del sistema de potencia regional. Esta simulación permite realizar un estudio de flujo de potencia y perfiles de tensión al sistema eléctrico centroamericano ante distintos escenarios. La herramienta de simulación ETAP fue donada para la realización de estudios doctorales del autor principal.

Materiales y métodos

El SER se modeló y simuló a partir de los datos proporcionados por el Centro Nacional de Control de Energía (CENCE) del Instituto Costarricense de Electricidad. El cuadro 1 se muestra la capacidad de generación instalada en MW al año 2019 [5] y modelada usando ETAP. Se puede observar que predomina la generación hidráulica y termoeléctrica en un 39.17% y 33.57% respectivamente.

Respecto a la generación, se consideró de acuerdo con el recurso energético. Los generadores sincrónicos se modelaron como de polos lisos y polos salientes con el modelo de sexto orden ya que la información estaba disponible, sin embargo, las plantas solares y eólicas se modelaron usando los modelos incluidos para tales tipos de generación en el software ETAP.

En el software ETAP puede simular este tipo de generación ya que dispone de librerías con datos reales para contemplar dicho recurso, sin embargo, los datos originales, tenían asociados generadores genéricos por lo que hubo que investigar los recursos de dicha generación.

En el informe de CEPAL [5] se dispone de información para identificar las fuentes de generación según el recurso. En la base de datos original, la generación tiene asociada un nombre identificador, lo que facilitó ubicarla según el recurso a partir del informe de la CEPAL.

Cuadro 2. Producción histórica de Electricidad para Centroamérica.

AÑO	Generación GWh									% Generación		Demanda Máxima (MW)
	Hidráulica	Geotérmica	Eólica	Co-Generación	Solar	Biogás	Térmica	Público	Privado	REN	noREV	
2014	21341.8	3819	2080	2221.4	10.1	33	17354	16173.9	30685.3	62.97	37.03	7824.95
2015	22223.9	3664.5	3122.7	2615.3	590.7	46.9	17264.8	14580.6	34948.4	65.14	34.86	8095.62
2016	22490	3725.3	3279.3	3129.5	1166.7	8.6	17036.4	14054	36781.7	66.49	33.51	8274.08
2017	26829	3598.3	3197.7	3163.1	1458	60.9	13541.8	15768.3	36080.51	73.88	26.12	8420.28
2018	26568.1	3676.5	4423	3248.9	1756.3	71.2	13276.3	15014.6	38005.7	74.96	25.04	8509.39
2019	21454.5	4146.5	4386.2	3484.5	2165.6	74.1	18364.3	14017.2	40058.6	66.04	33.96	8863.1

REN: fuentes renovables. noREN: fuentes no renovables. Fuente: basado en [5]

Con respecto a la producción de electricidad en el cuadro 2 se observa la generación histórica de acuerdo con el recurso en la región, no obstante, la base de datos corresponde al 2021 por lo que los despachos simulados se encuentran en concordancia con lo mostrado en el cuadro 2, con el correspondiente ajuste debido al crecimiento histórico de la demanda eléctrica regional.

Se corrieron simulaciones del sistema eléctrico tomando en cuenta seis escenarios: invierno y verano, cada uno en máximo, medio y mínimo. El invierno se refiere a la época lluviosa (periodo entre los meses de mayo hasta diciembre) de la región mientras el verano es la estación seca (periodo entre los meses de enero hasta abril) por lo tanto los despachos de las plantas y la demanda de la carga cambian significativamente en la región en ambas estaciones variando significativamente los flujos de potencia. La condición máxima se refiere al periodo de máxima demanda, el medio al periodo valle y el mínimo al periodo nocturno.

El sistema de transmisión posee características para los diversos niveles de tensión que existen en la zona. Existe una interconexión binacional entre Guatemala-México con un nivel de tensión de 400 kV interconecta la región con el norte a través de una línea de transmisión de 98.6 km y dos transformadores de 225 MVA. La línea de transmisión de SIEPAC tiene una longitud total de 1789.23 km y se conecta con los países de la región a través de 18 subestaciones [6], [7]. La infraestructura actual está prevista para dos circuitos de 300 MW cada uno, no obstante, a la fecha solo está en operación uno.

El nivel de tensión del sistema regional que predomina es 230 kV, pero a nivel interno de los países se encuentran tensiones de 138, 115, 69, 43, 34.5, 24.9 kV entre otros. A nivel regional se han instalado 11302 km de líneas en 230 kV, 3967 km en 138 kV, 1833 km en 115 kV y 3965 km en 69 kV.

Además, se tiene instalado cerca de 1603 MVAR en compensación de potencia reactiva capacitiva mientras se tienen 594 MVAR en compensación de potencia reactiva inductiva. Las pérdidas técnicas [5] a nivel regional son del 16.8% en 2018 con un porcentaje de penetración eléctrica del 90.7%. Por último, en capacidad de transformación es de 57430 MVA en transformadores de dos y tres devanados.

Resultados obtenidos en la simulación realizada

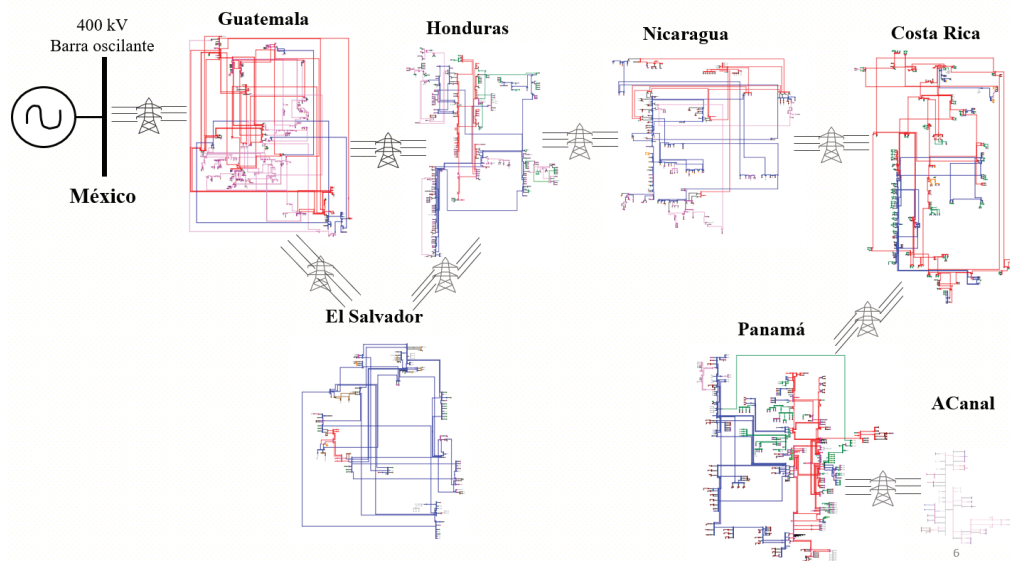


Figura 1. Vista General del Sistema Regional.

Simulado en ETAP

La figura 1 se muestra de forma general el sistema de potencia regional simulado en ETAP, en la que se simuló cada país de forma separada y se integró cada uno de ellos a través de las interconexiones. Todo el sistema regional está conectado a México desde Guatemala el cual

funge como la barra oscilante en el sistema simulado. Los elementos simulados en la red se describen en el cuadro 3 donde el sistema regional se simuló con más de 2150 barras en los niveles de tensión mencionados anteriormente.

Cuadro 3. Resumen de elementos a simulados en el sistema eléctrico regional.

Escenario	Período	Elementos simulados en la red	Resultados de la simulación con PSS/E	Resultados de la simulación con ETAP	Diferencias $\epsilon_0 - \epsilon_1$	Porcentaje de error
Invierno Máximo	17:00 horas hasta 21 horas	2192 B	Generación	Generación	Generación 61 MW	Generación 0.14%
		652 G	43628 MW	43567 MW	Carga	Carga
		852 Zp	Carga	Carga	90 MW	0.21 %
		137 S	43342 MW	43252MW	Pérdidas 39 MW	
		2272 L	Pérdidas	Pérdidas		
		1210 T	286 MW	325 MW		
Invierno Medio	13:00 horas hasta 17:00 horas	2192 B	Generación	Generación	Generación 123 MW	Generación 0.28%
		650 G	43418 MW	43541 MW	Carga	Carga
		852 Zp	Carga	Carga	90 MW	0.21 %
		138 S	43133 MW	43223 MW	Pérdidas 32 MW	
		2272 L	Pérdidas	Pérdidas		
		1210 T	285 MW	317 MW		
Invierno Mínimo	21:00 horas hasta 05:00 horas	2192 B	Generación	Generación	Generación 42 MW	Generación 0.10%
		650 G	40234 MW	40192 MW	Carga	Carga
		851 Zp	Carga	Carga	58 MW	0.14 %
		113 S	40062 MW	40004 MW	Pérdidas 16 MW	
		2272 L	Pérdidas	Pérdidas		
		1210 T	172 MW	188 MW		
Verano Máximo	17:00 horas hasta 21 horas	2176 B	Generación	Generación	Generación 75 MW	Generación 0.17%
		640 G	43327 MW	43402 MW	Carga	Carga
		849 Zp	Carga	Carga	53 MW	0.12 %
		137 S	43140 MW	43193 MW	Pérdidas 16 MW	
		2253 L	Pérdidas	Pérdidas		
		1200 T	187 MW	209 MW		
Verano Medio	13:00 horas hasta 17:00 horas	2176 B	Generación	Generación	Generación 114 MW	Generación 0.26%
		640 G	43252 MW	43366 MW	Carga	Carga
		848 Zp	Carga	Carga	77 MW	0.18 %
		125 S	43064 MW	43141 MW	Pérdidas 37 MW	
		2253 L	Pérdidas	Pérdidas		
		1200 T	187 MW	224 MW		
Verano Mínimo	21:00 horas hasta 05:00 horas	2175 B	Generación	Generación	Generación 87 MW	Generación 0.22%
		639 G	40142 MW	40229 MW	Carga	Carga
		848 Zp	Carga	Carga	72 MW	0.18 %
		107 S	40064 MW	40136 MW	Pérdidas 13 MW	
		2272 L	Pérdidas	Pérdidas		
		1199 T	77 MW	90 MW		

B: Barras, G: Generadores, ZP: cargas, S: compensación de potencia reactiva, L: Líneas de Transmisión, T: Transformadores de Potencia

Discusión

El sistema eléctrico de potencia regional modelado consta de los elementos mostrados en el cuadro 3, tanto para la generación y transmisión. La simulación usando ETAP se valida contra los datos obtenidos por PSS/E, debido a que estos originalmente fueron comparados contra mediciones reales.

El CENCE tiene acceso directo a las mediciones regionales y por lo tanto valida estas mediciones contra los valores simulados en PSS/E. Variaciones de hasta ± 150 MW ($<0.5\%$ de los valores de PSS/E con respecto a ETAP) se consideran aceptables en esta simulación debido a la magnitud de la simulación y la cantidad de datos y elementos contemplados.

De acuerdo con el cuadro 3, se obtuvieron resultados aceptables en la simulación pues se alcanzaron porcentajes de error menores que el 0.5% para la generación y carga en el estudio de flujo de potencias. Las diferencias entre los valores se deben a que los escenarios proporcionados contemplan diversos manejos de cargas (algunas cargas no están conectadas), por lo que en la simulación propuesta usando ETAP toma en cuenta el total de la carga con el fin de simular la condición más extrema.

Es importante mencionar que en todos los casos (escenarios) abarcan más de 2150 barras, 650 generadores, 1200 transformadores, 2250 líneas de transmisión y 850 cargas. El sistema se encuentra simulado hasta la barra de distribución (secundarios de los transformadores), no obstante, los datos de la distribución no se tienen disponibles pues son propios de cada compañía eléctrica.

Una vez validado el estudio de flujos de potencia se presentan oportunidades para la academia para desarrollar investigación en el análisis estudios de confiabilidad y resiliencia [8]-[10] pues se puede valorar condiciones de salidas de generadores, líneas de transmisión y cargas, así como la reconfiguración del sistema ante eventos extremos. Del mismo modo, la integración de la energía renovable y el manejo de demanda [11]-[14] pues se pueden modelar la energía solar, eólica y el almacenamiento.

Asimismo, dado que se tienen incluidos todos los elementos de la red eléctrica, se pueden realizar análisis de cortocircuito, estabilidad transitoria y de tensión y cualesquiera de los utilizados en análisis y simulación de grandes redes de potencia ya que estos módulos están incluidos en la licencia académica.

Conclusiones

ETAP ofrece resultados similares a las mismas condiciones de análisis con respecto al software utilizado a nivel regional por los operadores centroamericanos pues los resultados fueron satisfactorios con respecto a su homólogo en el estudio de flujos de potencia. En dicho análisis los datos obtenidos muestran variaciones menores al 0.5% con respecto a los obtenidos con PSS/E.

La simulación se comparó en seis (6) escenarios regionales tanto en invierno y verano (máximo, medio y mínimo) con todos los elementos de la red como son los generadores, transformadores, líneas de transmisión y esquemas de compensación de potencia reactiva.

SIEPAC se ha desarrollado y constituido a través de los años supliendo los requerimientos energéticos de la región, por lo que obtener un modelo que permita el análisis y simulación es importante para la planificación y expansión del sistema.

Por esta razón, una herramienta de análisis de sistemas de potencia como la descrita anteriormente traerá grandes beneficios para que la academia y centros de investigación logren aportar conocimiento y proponer oportunidades tanto a nivel regional como de forma individual en los países.

Agradecimientos

Este artículo está soportado y apoyado por el Proyecto de Investigación VIE 5402-1341-1801 y la oficina de becas del Instituto Tecnológico de Costa Rica. De igual manera se agradece al CENCE-ICE por la colaboración con la base de datos y el apoyo ingenieril en la investigación doctoral. Del mismo modo a CFS SISTEMAS S.A (representante exclusivo de ETAP para Costa Rica) y a ETAP por proveer una licencia académica para el desarrollo del proyecto doctoral.

Referencias

- [1] C. E. Fallas Saborío, "Sistema de Interconexión Eléctrica para los Países de América Central: Una historia exitosa de colaboración e integración regional". Gestión Documentación e Información GEDI-ICE, 2014.
- [2] C. Meza, "A review on the Central America Electrical Energy Scenario", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 566–577, 2014. doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.022
- [3] M. A. Lazo Vega, "Centroamérica y el cambio climático: De la planificación a la acción," *Realidad y Reflexión*, 2020 Año. 20, N° 51, p71-101, 2020. http://hdl.handle.net/11592/9461
- [4] G. A. Gómez-Ramírez, C. Meza, y S. Morales-Hernández, "Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas", *Tecnología en Marcha*, vol. 34, n.º 3, pp. Pág. 70–82, jun. 2021. doi.org/10.18845/tm.v34i3.5352
- [5] CEPAL, "Estadísticas de producción de electricidad de los países del sistema de la integración centroamericana (SICA): datos preliminares a 2020," 2020. https://hdl.handle.net/11362/47019
- [6] EOR, "Tomo I: Planificación de largo plazo de la generación y la transmisión regional correspondiente al período 2019-2028," 2019.
- [7] EOR, "Tomo II: Planificación de largo plazo de la generación y la transmisión regional correspondiente al período 2019-2028," 2019.
- [8] Gómez-Ramírez, Gustavo Adolfo. "Evolución y tendencias de índices de confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia." *Revista Tecnología en Marcha* 29.2 (2016): 3-13. doi.org/10.18845/tm.v29i2.2687
- [9] Cresta, M., Gatta, F. M., Geri, A., Maccioni, M., & Paulucci, M. (2021). "Resilience Assessment in Distribution Grids: A Complete Simulation Model. *Energies*", 14(14), 4303. doi.org/10.3390/en14144303
- [10] Mohamad, F., & Teh, J. (2018). "Impacts of energy storage system on power system reliability: A systematic review". *Energies*, 11(7), 1749. doi.org/10.3390/en11071749
- [11] Sharma, N., & Sankar, S. (2018, September). "Modeling and control of battery energy storage system for providing grid support services". In 2018 Clemson University Power Systems Conference (PSC) (pp. 1-5). IEEE. doi.org/ 10.1109/PSC.2018.8664018
- [12] Zhou, A., Yan, R., & Saha, T. K. (2019). "Capacity and control strategy design of isolated micro-grid with high renewable penetration". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(3), 1173-1184. doi.org/ 10.1109/TSTE.2019.2920274
- [13] Sperstad, I. B., Istad, M., Sæle, H., Korpås, M., Oleinikova, I., Hänninen, S. & Marinelli, M. (2020, October). "Cost-Benefit Analysis of Battery Energy Storage in Electric Power Grids: Research and Practices". In 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe) (pp. 314-318). IEEE. doi.org/ 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248895
- [14] Zhu, Y., Liu, C., Sun, K., Shi, D., & Wang, Z. (2018). "Optimization of battery energy storage to improve power system oscillation damping". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(3), 1015-1024. doi.org/ 10.1109/TSTE.2018.2858262
- [15] L. Bam and W. Jewell, "Review: power system analysis software tools," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, 2005, pp. 139-144 Vol. 1, doi: 10.1109/PES.2005.1489097. doi.org/ 10.1109/PES.2005.1489097

- [16] Y. Kumar, V. K. Devabhaktuni and S. Vemuru, "Comparison of power system simulation tools with load flow study cases," 2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), 2015, pp. 290-294, doi: 10.1109/EIT.2015.7293355. doi.org/ 10.1109/EIT.2015.7293355
- [17] P. Selvan and R. Anita, "Revelation for New User to Select Power System Simulation Software", 5003, vol. 1, no. 7, pp. 366-375, Nov. 2011. <https://archive.aessweb.com/index.php/5003/article/view/3308>
- [18] N. Hutcheon and J. W. Bialek, "Updated and validated power flow model of the main continental European transmission network," 2013 IEEE Grenoble Conference, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/PTC.2013.6652178. doi.org/ 10.1109/PTC.2013.6652178

Efecto de la morosidad sobre la rentabilidad en una Institución microfinanciera de Costa Rica: Propuesta de un modelo financiero




Effect of default on profitability in a Costa Rican microfinance institution: Financial model proposal

David Barboza-Navarro¹, Johanna Solórzano-Thompson², Javier Paniagua-Molina³

Fecha de recepción: 27 de enero, 2022
Fecha de aprobación: 21 de abril, 2022

Barboza-Navarro, D; Solórzano-Thompson, J; Paniagua-Molina, J. Efecto de la morosidad sobre la rentabilidad en una institución microfinanciera de costa rica: propuesta de un modelo financiero. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 59-74.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.6107>

- 1 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: jose.barbozanavarro@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5444-3814>
- 2 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: johanna.solorzano@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0276-6849>
- 3 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: javier.paniagua@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2815-5437>

Palabras clave

Finanzas; análisis fundamental; econometría; inclusión financiera; administración.

Resumen

Se analizó el efecto que tiene la morosidad en las carteras de crédito sobre la rentabilidad de una Institución Microfinanciera, a través del análisis fundamental con proyección de estados financieros, sensibilización del indicador de rentabilidad y formulación de escenarios macroeconómicos con incrementos en el costo del financiamiento de los créditos. Los resultados demuestran el efecto contraproducente sobre la rentabilidad al registrar altos índices de morosidad, aunque el modelo de negocio de la empresa es lo suficientemente sólido como para afrontar aumentos persistentes en la morosidad. Fortalecer las estrategias operativas y promover la investigación en la industria microfinanciera costarricense y latinoamericana, es primordial para mejorar su desempeño y facilitar la inclusión financiera.

Keywords

Finance; fundamental analysis; econometrics; financial inclusion; management.

Abstract

The effect of default in loan portfolios on the profitability of a Microfinance Institution was analyzed through fundamental analysis with projection of financial statements, awareness of the profitability indicator and formulation of macroeconomic scenarios with increases in the cost of financing. The results show the counterproductive effect on profitability of high default rates, although the company's business model is robust enough to cope with persistent increases in default. Strengthening operational strategies and promoting research in Costa Rican and Latin American microfinance industry is essential to improve its performance and financial inclusion.

Introducción

La disposición de préstamos bancarios en Costa Rica usualmente es más accesible para empresas maduras y con garantías reales, aun cuando el financiamiento es imprescindible en las primeras etapas de funcionamiento de una empresa [1]. Las Instituciones Microfinancieras (IMF) solventar necesidades financieras a personas que, por lo general, no tienen acceso a créditos de la banca tradicional debido a su historial crediticio, falta de garantías e incumplimiento de otros requisitos.

Los créditos concedidos por las IMF tienen como finalidad cubrir necesidades especiales y de consumo, como invertir en educación, comprar equipos de producción y mejorar viviendas e infraestructuras [2]. En este sentido, las IMF han reforzado y promovido la inclusión financiera de pequeños empresarios y productores en Costa Rica y América Latina [3], [4].

Ante el panorama de inestabilidad mundial generado por la pandemia del COVID-19, las IMF son fundamentales en la reactivación económica de los países, al atender las necesidades de los sectores rural e informal [5]. Por esta razón, se han promocionado programas de fortalecimiento con inyección de fondos monetarios y apoyo en la transformación digital [6].

A pesar del papel primordial que cumplen las IMF como promotoras del desarrollo económico inclusivo, los nichos de mercado que atienden generan inseguridad en el proceso para otorgar préstamos. Esto se puede traducir en incrementos del índice de morosidad en las carteras

de crédito, como es el caso de Costa Rica, que registró un incremento absoluto del 4% en el indicador de cartera con atrasos superiores a 30 días (CeR>30) en el primer semestre del 2020, en comparación con los datos registrados a finales del 2019 [7].

La exposición a altos índices de morosidad y pérdidas futuras ante la posibilidad de impago, puede ocasionar efectos negativos sobre la rentabilidad. El Sistema Financiero Nacional (SFN) de Costa Rica sufrió un incremento en el riesgo de crédito debido a los desajustes económicos ocasionados por el COVID-19, pero la solidez y la liquidez registradas antes del acontecimiento mundial, permitieron hacer frente y soportar los efectos negativos [8].

Esta afirmación respalda la implementación y el fortalecimiento de herramientas analíticas adecuadas para las IMF, que permitan tomar decisiones premeditadas y mejorar la gestión empresarial, para superar los retos del mercado, mejorar sus operaciones y expandir el alcance de la población [2].

Los microcréditos otorgados por las IMF en Costa Rica son fundamentales para mejorar la calidad de vida de las personas de escasos recursos económicos. Estos microcréditos se asignan bajo un modelo de confianza, flexibilidad y responsabilidad social, aunque la morosidad latente puede repercutir en su recuperación y rentabilidad [9]–[12].

Son muchos los autores que han analizado los factores determinantes de la rentabilidad en las entidades financieras, entre los que se sobresalen estudios realizados en la banca europea, Malawi, Turquía, Túnez y Grecia, país que se vio afectado por la recesión económica y la crisis bancaria [13]–[17]. No obstante, la evidencia científica es escasa en cuanto al estudio de la rentabilidad en la industria microfinanciera Latinoamericana, aunque la investigación aplicada en la banca comercial se puede replicar debidamente.

En el cuadro 1 se presenta un listado de factores que afectan la rentabilidad de una entidad financiera, dando especial énfasis a la morosidad crediticia.

Cuadro 1. Factores determinantes de la rentabilidad en entidades financieras.

Factor	Descripción del efecto	Fuente
Morosidad	El deterioro de la calidad de la cartera impacta negativamente la recuperación de los saldos pendientes y la rentabilidad.	[18]–[28]
Eficiencia operativa	El uso eficaz de los recursos económicos propicia aumentos en la rentabilidad empresarial.	[19], [22], [25]–[27]
Apalancamiento	En el corto plazo, un mayor apalancamiento favorece la generación de utilidades, mientras que al largo plazo, un menor apalancamiento implica mayor solidez financiera y rentabilidad.	[18], [22], [24], [25], [29]
Capacidad comercial	Es la capacidad de generación de ingresos y utilidades en función del tamaño de la cartera.	[24], [27], [29]
Liquidez	Las entidades con mayor índice de liquidez tienen más posibilidades de ampliar sus fuentes de financiamiento e incrementar el tamaño de la cartera.	[21], [22]
Inflación y crecimiento económico	El aumento generalizado de los precios puede perjudicar la recuperación de los préstamos. Mientras que, mejores condiciones económicas favorecen la colocación de préstamos menos riesgosos.	[18], [19], [21], [23], [25], [29]

A pesar de que la disyuntiva tradicional señala que afrontar más riesgo propicia una mejora de la rentabilidad, esta afirmación podría no adecuarse a la realidad de las IMF a causa de las características del mercado que atienden [23], [30], [31].

Recientemente las IMF de Centroamérica y el Caribe registraron un aumento prolongado de la morosidad que afectó negativamente su rentabilidad, y aunque el efecto puede perder relevancia a largo plazo, se incrementan los gastos de gestión y recuperación de saldos pendientes [22], [32]. Esta situación también fue objeto de estudio en Perú y se concluyó que las IMF sufrieron problemas financieros a causa de la pérdida de calidad de la cartera y la estrategia de financiamiento [33].

Con estas afirmaciones resulta evidente que la gestión inadecuada de los activos financieros afecta la rentabilidad de las empresas acreedoras de préstamos, en la medida que limita su cartera disponible para colocar en el mercado y el nivel de capitalización [23], [25], [27], [28], [34], [35].

Conforme lo anterior, es imprescindible desarrollar procedimientos metodológicos que fortalezcan la capacidad administrativa y la toma de decisiones en las IMF ante diferentes escenarios macro y microeconómicos que puedan afectar su desempeño.

Una opción es la modelación financiera con simulación de escenarios con probabilidad de ocurrencia. Esta es una herramienta de gestión empresarial que consiste en el análisis fundamental e integral de Estados Financieros y el entorno macroeconómico [36]–[39]. Se basa en el principio de parsimonia para explicar los fenómenos de la manera más sencilla posible, fundamentando la relación entre variables y factores de riesgo que afectan los indicadores de rentabilidad, a través de juicios de valor de experto, ratios financieros, tasas de crecimiento y análisis de sensibilidad [40]–[46].

Este enfoque se puede reforzar con modelos econométricos de regresión lineal y de series de tiempo como el proceso autorregresivo integrado de promedios móviles (ARIMA, por sus siglas en inglés), para explicar la tendencia de crecimiento de las partidas contables [22], [25], [47], [48].

Para llevar a cabo este tipo de estudios inicialmente se deben definir indicadores de rentabilidad apropiados, que en la mayoría de casos suelen medir la rentabilidad sobre los activos (ROA) y la rentabilidad sobre el patrimonio (ROE). Sin embargo, podrían ser inadecuados en entidades financieras porque suponen indiferencia al invertir en dos activos con el mismo rendimiento a distinto nivel de riesgo, no contemplan medidas de riesgo financiero que pueden sesgar la rentabilidad, no toman en cuenta el grado de apalancamiento sobre los activos financieros y podrían ser incongruentes en entidades con patrimonios poco representativos [25], [35].

En contraste con lo anterior, la rentabilidad de una IMF se puede analizar a través de la sostenibilidad operativa y de liquidez, al evaluar si los ingresos operativos son suficientes para cubrir los gastos operativos y hacer frente a los requerimientos de dinero en el corto plazo, es decir, se relaciona la sostenibilidad del negocio en función de los recursos utilizados para su operación [27], [49], [50].

Con la premisa de contribuir en el área de investigación de la rentabilidad en las microfinancieras, este artículo propone un procedimiento metodológico con herramientas econométricas y modelación financiera, para analizar el efecto que ejerce la morosidad sobre la rentabilidad de una IMF costarricense que otorga microcréditos en diferentes zonas rurales del país.

Metodología

Se analizó el efecto de la morosidad de 15 carteras de crédito sobre la rentabilidad de una IMF en Costa Rica. Las carteras eran administradas directamente por empresas socias de la IMF en cuestión, se seleccionaron por conveniencia según la disponibilidad de información y representaban cerca del 54% de la cartera total a febrero del 2020 (6 432 créditos).

Se utilizó el método de modelación financiera con técnicas analíticas deductivas y prospectivas, con la información histórica de 36 periodos mensuales de los Estados Financieros (mar-2017 a feb-2020) y la proyección mensual a diciembre del 2024 con base en ratios financieros y tasas de crecimiento⁴ en periodos recientes con menor volatilidad, con el supuesto de que se mantendrán estables en el tiempo.

Se aplicó el análisis de regresión lineal múltiple para proyectar la cartera de créditos total (corto y largo plazo) y los intereses por cobrar totales, a través del método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), que minimiza la suma de residuos de la regresión y proporciona coeficientes insesgados de varianza mínima [51].

Con la ecuación 1 se estima la variación en la cartera de créditos por cambios en indicadores macroeconómicos, bajo el entendimiento de que un aumento en la tasa de interés (TBP) encarece los créditos y un incremento de la actividad económica (IMAE) propicia más financiamiento para el sector privado. En la ecuación 2 se mide el efecto de la morosidad sobre la rentabilidad a través de un incremento en los intereses por cobrar.

$$\ln CCT_t = \beta_0 + \beta_1 \ln TBP_t + \beta_2 \ln IMAE_t + \beta_3 \ln CCT_{t-1} + u_t \quad (1)$$

$$\ln(IPCT)_t = \beta_0 + \beta_1 \ln MRP_t + \beta_2 \ln IPCT_{t-1} + u_t \quad (2)$$

donde, *CCT* es la cartera de créditos total; *TBP* es la tasa básica pasiva; *IMAE* es el índice de actividad económica de Costa Rica; *IPCT* son los intereses por cobrar totales; *MRP* es la mora promedio ponderada de las carteras de crédito con respecto a su participación relativa en la cartera total de la *IMF* en el año 2019⁵.

Ya que la evidencia indica que la morosidad se podría ver afectada por la tasa de interés de los préstamos [52]–[55], se estimó una tasa de interés interna promedio ponderada (*ITPM*) de las carteras de crédito seleccionadas, que se proyectó a futuro con el siguiente ratio:

$$\text{Ratio tasa de interés interna} = \frac{ITPM}{TBP} \quad (3)$$

La proyección de los indicadores macroeconómicos *TBP* e *IMAE* se realizó con modelos ARIMA (ecuación 5) con 853 observaciones (ene-1950 a ene-2021) y 359 observaciones (ene-1991 a nov-2020), respectivamente [56].

4 No se presentan los indicadores para mantener la confidencialidad de la información de la IMF.

5 Año más reciente con información mensual completa al momento de la investigación. No se consideran todos los datos históricos por procesos de medias móviles que pueden subestimar o sobreestimar los resultados.

$$\begin{aligned} \phi(B)Z_t &= \mu + \theta(B)a_t; \\ \therefore \phi(B) &= (1 - \phi_1B^1 - \phi_2B^2 - \dots - \phi_pB^p); \\ \theta(B) &= (1 - \theta_1B^1 - \theta_2B^2 - \dots - \theta_qB^q) \end{aligned} \tag{4}$$

donde, $\phi(B)$ es el polinomio de rezagos en Z_t ; $\theta(B)$ es el polinomio de rezagos en a_t ; B es un operador de rezagos; ϕ y θ son los estimadores muestrales de AR y MA; μ es la media de Z_t ; a_t son los errores de estimación para Z_t .

Para evaluar el efecto de la morosidad sobre la rentabilidad se utilizó el indicador financiero *RFA* (ecuación 5), que mide la capacidad de los activos totales (*AT*) para generar flujo de efectivo operativo (*EFOB*) antes de variaciones en activos y pasivos de financiamiento e inversión.

$$RFA = \frac{EFOB}{AT} \tag{5}$$

Entre mayor sea el indicador *RFA*, mayor es la rentabilidad, ya que la *IMF* opera bajo un negocio de efectivo y el efecto inmediato de la morosidad se presenta sobre la generación de flujos de efectivo, afectando las cuentas de ingresos por amortizaciones e interés y las cuentas de intereses por cobrar.

Se prefiere el uso del indicador *RFA* sobre los indicadores comunes de rentabilidad (*ROE* y *ROA*) ya que el efecto de la morosidad sobre la utilidad se refleja a largo plazo, porque las cuentas por cobrar se sujetan a procedimientos administrativos y legales prolongados para ser consideradas como incobrables. No obstante, el efecto sobre el flujo de efectivo operativo sí es observable en el corto plazo.

Para evaluar la solidez financiera de la *IMF* se realizó un análisis de sensibilidad para el indicador *RFA*, en el que se plantean dos escenarios macroeconómicos, a saber:

1. El primer escenario sugiere un crecimiento esperado estable en la *MRP* conforme a la variación histórica.
2. En el segundo escenario se proyectan dos situaciones hipotéticas pesimistas con crecimiento en la morosidad según se ejerce presión sobre los factores que explican su variabilidad, principalmente la *TBP*, que afecta la *ITPM*.

Resultados y discusión

Las carteras de crédito seleccionadas colocaban microcréditos de 1747 \$USD en promedio, a 36 meses plazo, con una tasa de interés del 26%, y eran asignados en su mayoría a clientes hombres, casados y sin hijos. El 71% de los créditos registró una mora máxima inferior a 30 días, el 19% de 31 a 180 días, mientras que el 10% superó 180 días de atraso. Estos últimos créditos representaban el mayor riesgo para la recuperación de saldos y financiaban mayoritariamente actividades comerciales.

La morosidad registrada por la *IMF* tuvo un aumento sostenido en el periodo 2017-2020, aunque fue una situación generalizada en todo el sector microfinanciero centroamericano y del Caribe [7]. En la Figura 1 se presenta la mora promedio histórica (mar-2017 a feb-2020) y proyectada

(mar-2020 a dic-2024)⁶, con un incremento atípico en enero y febrero del 2020, que se podría explicar por consecuencia a las expectativas negativas por la pandemia del COVID-19 o procesos estacionales en los primeros meses del año.

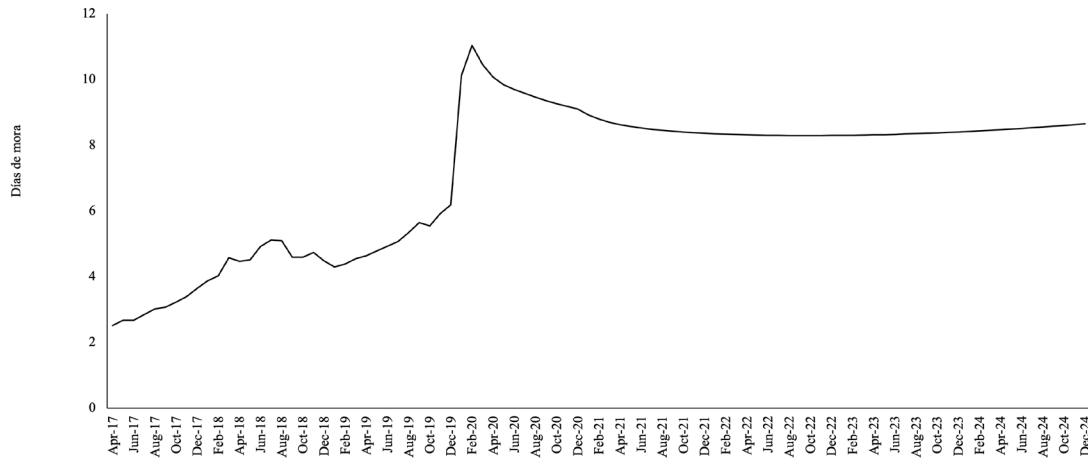


Figura 1. Mora promedio ponderada (MRP) histórica y proyectada de la IMF, 2017-2024.

En concordancia con el incremento de la morosidad, la cuenta de intereses por cobrar totales (IPCT) tuvo un crecimiento prolongado, con un cambio de 82% en el periodo observado. Si bien es cierto, el crecimiento es menos pronunciado en comparación con la MRP, pero los cambios sugieren un efecto-causa entre la morosidad y la rentabilidad, tal y como se expuso en el apartado metodológico.

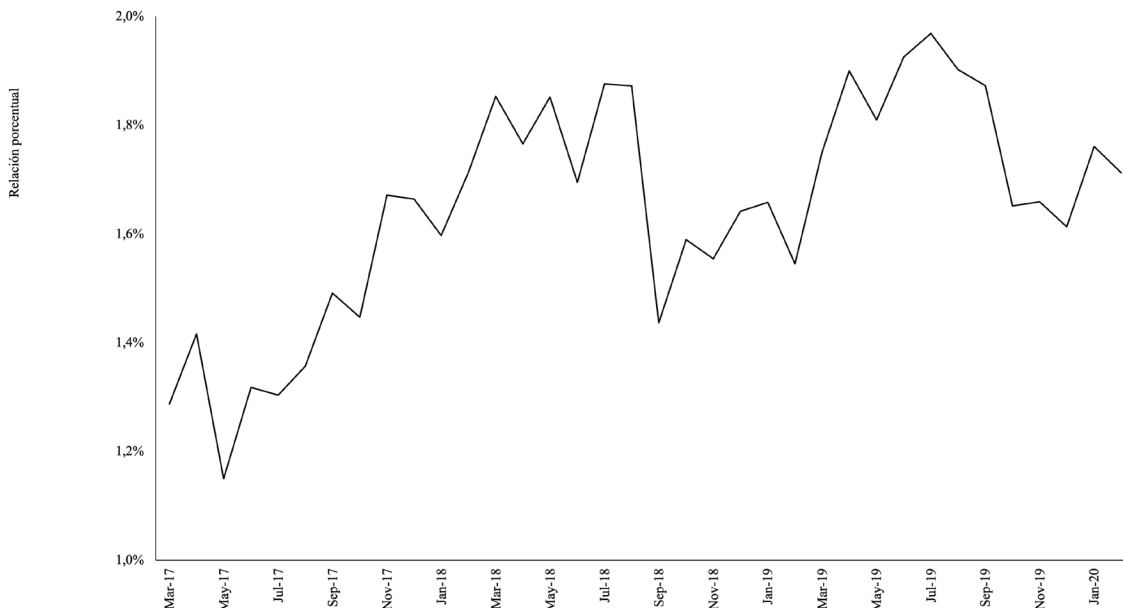


Figura 2. Relación porcentual de los intereses por cobrar con respecto al activo total de la IMF, 2017-2020.

6 Ya que el objetivo de esta investigación fue analizar el efecto de la morosidad sobre la rentabilidad, los datos reales de morosidad e indicadores financieros se multiplicaron por un número decimal aleatorio para proteger la confidencialidad de la información.

La modelación econométrica respalda la relación expuesta y demuestran la elasticidad entre MRP e IPCT (cuadro 2). Los resultados indican que, por el aumento del 1% en la MRP, los IPCT incrementan 0,14%, aunado al componente autorregresivo de un periodo.

En lo que respecta al crecimiento de la cartera de créditos total (CCT), el modelo econométrico planteado establece una relación causal de elasticidad entre la CCT, la TBP, el IMAE y un componente autorregresivo (cuadro 2). La interpretación del modelo es la misma que en el caso anterior y los resultados son aceptables en vista de que no hay problemas de heteroscedasticidad ni autocorrelación que afecten el pronóstico.

Cuadro 2. Modelo econométrico de los intereses por cobrar totales (IPCT) y la cartera de créditos total (CCT) de la IMF.

Variable dependiente	Variable independiente	Coefficiente de regresión	Estadístico t	Valor p	
I_IPCT	Constante	5,50	2,55	0,02	**
	I_MRP	0,14	1,79	0,08	*
	I_IPCT _{t-1}	0,67	5,09	1,7E-05	***
	R ²		0,8112		
	R ² ajustado		0,7991		
	CIA		-71,8366		
	CIB		-67,2576		
	Breusch-Pagan		2,0652	0,3561	
	Wooldridge		1,7027	0,2019	
	Normalidad		7,2802	0,0262	**
I_CCT	Constante	1,1873	0,7146	0,4802	
	I_TBP	-0,1131	-1,4890	0,1466	
	I_IMAE	0,7842	1,6270	0,1139	
	I_CCT _{t-1}	0,7881	7,7270	1,0E-08	***
	R ²		0,8491		
	R ² ajustado		0,8344		
	CIA		-134,5541		
	CIB		-128,3327		
	Breusch-Pagan		1,0701	0,7843	
	Wooldridge		0,0893	0,7671	
	Normalidad		15,6524	4,0E-04	***

Nota: CIA: Criterio de Información de Akaike; CIB: Criterio de Información Bayesiano.

Los modelos ARIMA para el IMAE y la TBP, tienen una capacidad de predicción superior a 99% (Anexo 1). El IMAE presentó una caída a inicios del 2020 (Anexo 2) a expensas de la paralización productiva y comercial por la pandemia del COVID-19; posteriormente se da una fase de recuperación económica [57].

La TBP ha presentado escenarios de inestabilidad en el mediano plazo y disminución sostenida en el largo plazo desde la década de los años 90 (Figura 3), principalmente por el impulso de políticas macroeconómicas para incentivar la colocación de créditos [58]. En este caso, el modelo ARIMA proyecta una reducción en la TBP hasta alcanzar un nivel medio cercano a 3% a finales del 2024. Cabe destacar que estas proyecciones se realizaron antes de la declaración de pandemia mundial en 2020.

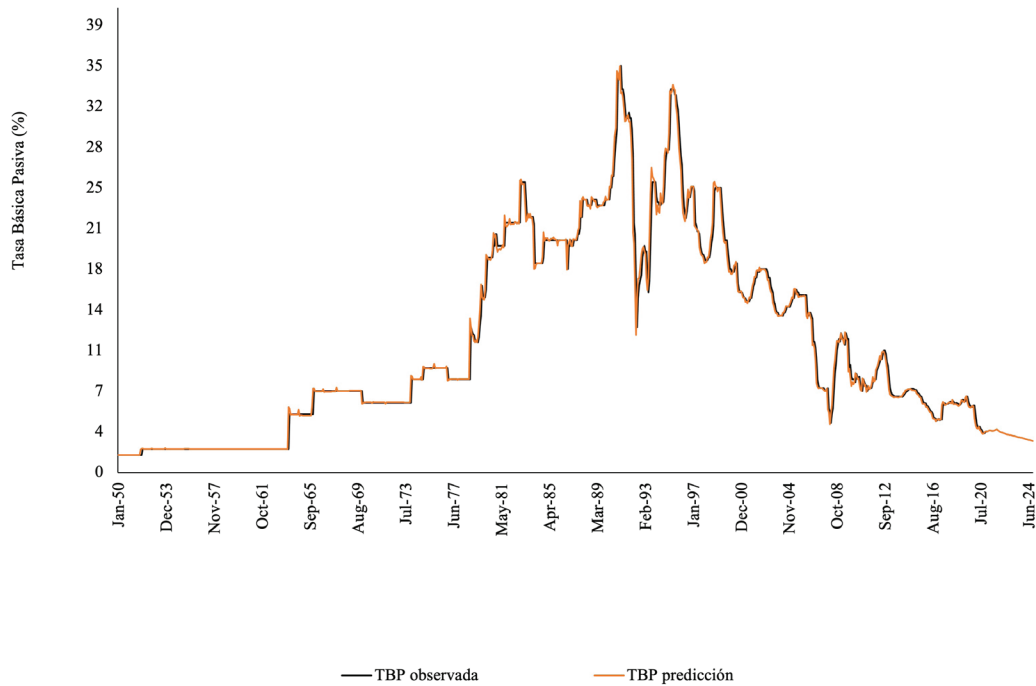


Figura 3. Evolución histórica y proyectada de la TBP, 1950-2024. Fuente: Elaboración propia con datos de [56].

La estabilidad de la TBP se podría ver presionada al alza por los problemas fiscales y de financiamiento público. Aunque el experto Luis Liberman destaca la diferencia sustancial entre la situación fiscal actual en comparación con la década de los 80, que registró el nivel histórico más elevado [59]. Dicha diferencia se basa en la diversificación económica de Costa Rica, en contraste con la dependencia al mercado internacional de café y banano para entonces [59]. Por esta razón, se espera que la TBP no presente picos de crecimiento en el mediano plazo, tal y como los que generaron la crisis económica de los años 80.

De acuerdo con las relaciones establecidas, se espera que una disminución de la MRP propicie una disminución en el cambio de los IPCT y el flujo de efectivo operativo, menos que proporcional al aumento en la cartera de créditos. Si se cumple esta relación, se dará un aumento en el indicador de rentabilidad RFA; en caso contrario, el efecto será negativo.

Análisis de sensibilización

En el análisis de sensibilización para el indicador RFA se obtuvieron los siguientes resultados para los dos escenarios macroeconómicos planteados:

Escenario estable

Se prevé que la morosidad crezca a tasas estables en el tiempo (Figura 1), con una variación media en la TBP de 3,53% a 2,71% en el periodo proyectado (2024). El IMAE crece según la proyección media a futuro, con un nivel entre 115 y 134. Con estas condiciones, la MRP presenta un escenario futuro estable a tasas decrecientes, a excepción del año 2020 por las razones antes expuestas.

Los resultados muestran para el escenario estable una relación anualizada esperada en el RFA de 5,69%, con un coeficiente de variación de 1,58%. Las condiciones en el crecimiento de la MRP no presentan un problema para la administración de la cartera de créditos por parte de la IMF. Sin embargo, deberán aplicar medidas para disminuir el crecimiento paulatino de la mora y evitar efectos negativos sobre la rentabilidad futura.

Escenario de pesimista

Este escenario plantea dos situaciones o subescenarios de aumentos en la TBP que presionan al alza la MRP a través de los incrementos en la tasa de interés interna asignada a los préstamos (ITPM).

En la primera situación se consideró toda la historia disponible de la TBP (1950-2021) a siete niveles medios (que se asumen constantes) de acuerdo con los intervalos de clases en la distribución de frecuencia (Figura 4). La segunda situación se plantea de la misma manera, pero con la historia más reciente (2000 al 2021), que excluye periodos de gran inestabilidad en la TBP (Figura 5). Además de los cambios en la TBP, se asume que el IMAE crece con tendencia al límite inferior del pronóstico, es decir, con niveles que varían entre 115,57 y 117,50 del 2020 al 2024.

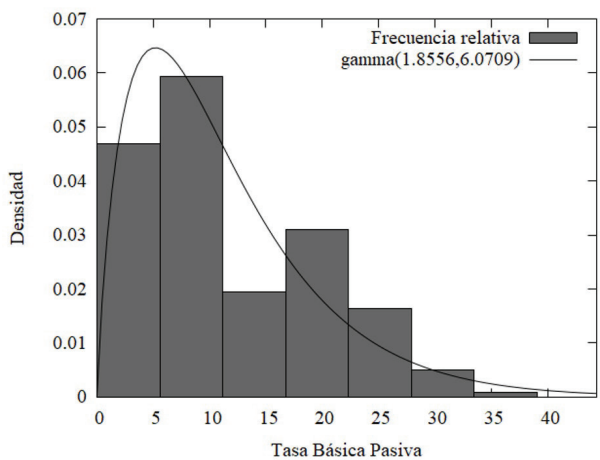


Figura 4. Distribución de frecuencia de la Tasa Básica Pasiva en Costa Rica, 1950-2021. Fuente: Elaboración propia con datos de [56].

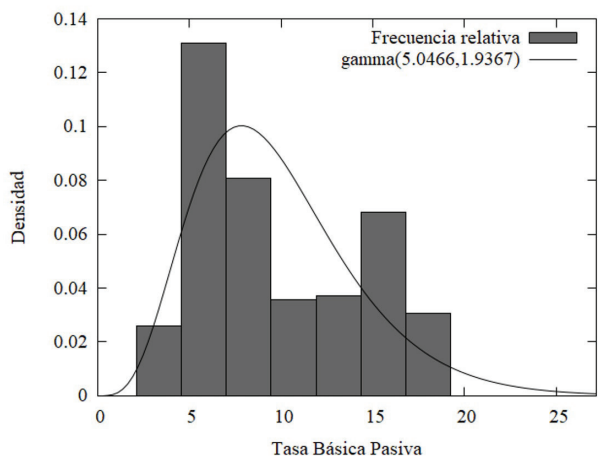


Figura 5. Distribución de frecuencia de la Tasa Básica Pasiva en Costa Rica, 2000-2021. Fuente: Elaboración propia con datos de [56].

Los resultados del análisis de sensibilización muestran reducciones en la rentabilidad según el RFA, en concordancia con los aumentos en la morosidad (cuadro 3). En la primera situación macroeconómica planteada existe una probabilidad de ocurrencia del 26% de que la TBP presente su nivel medio más bajo, lo que propicia una reducción a 4,39% en el RFA con respecto al escenario estable.

Cuadro 3. Resultados de la sensibilización sobre la rentabilidad (RFA) en el escenario pesimista.

Escenario pesimista	TBP media	MRP (días)	RFA	Cambio en RFA ¹	Prob. Porcentual	Prob. Acumulada
Situación 1 (TBP 1950-2021)	3,54%	13,84	5,44%	-4,39%	26,14%	26,14%
	8,38%	14,01	4,92%	-13,62%	33,18%	59,32%
	13,96%	14,22	4,56%	-20,00%	10,90	70,22%
	19,54%	14,43	4,30%	-24,48%	17,35%	87,57%
	25,13%	14,64	4,10%	-27,94%	9,14%	96,71%
	30,71%	14,85	3,94%	-30,75%	2,81%	99,52%
	34,25%	14,98	3,86%	-32,30%	0,48%	100,00%
Situación 2 (TBP 1950-2021)	3,96%	13,85	5,38%	-5,46%	26,14%	26,14%
	5,79%	13,92	5,16%	-9,41%	33,18%	59,32%
	8,23%	14,01	4,93%	-13,41%	10,90%	70,22%
	10,68%	14,10	4,75%	-16,57%	17,35%	87,57%
	13,12%	14,19	4,60%	-19,18%	9,14%	96,71%
	15,56%	14,28	4,47%	-21,42%	2,81%	99,52%
	17,39%	14,35	4,39%	-22,91%	0,48%	100,00%

Nota: Los cambios se estiman con respecto a la rentabilidad del escenario estable.

Conforme aumenta la TBP, según la distribución de frecuencia y las probabilidades de ocurrencia, disminuye la rentabilidad de la IMF. No obstante, aunque la situación menos probable y más perjudicial indica que la TBP puede ser superior a 34%, el indicador de rentabilidad desciende a 3,86%, lo que refleja solidez financiera en el modelo de negocio de la IMF.

Estos resultados son comparables y concuerdan con la segunda situación macroeconómica, en la que se generan reducciones menos pronunciadas en la rentabilidad. En la Figura 6 se visualiza una reducción en la rentabilidad conforme aumentan los días de mora promedio. Cabe destacar que en la segunda situación macroeconómica planteada se utiliza una serie de tiempo más pequeña que en la otra situación.

Finalmente, el ajuste entre los indicadores de MRP y la RFA se podría asociar a una ecuación polinómica de segundo grado, con coeficientes de determinación superiores al 99% (Figura 6).

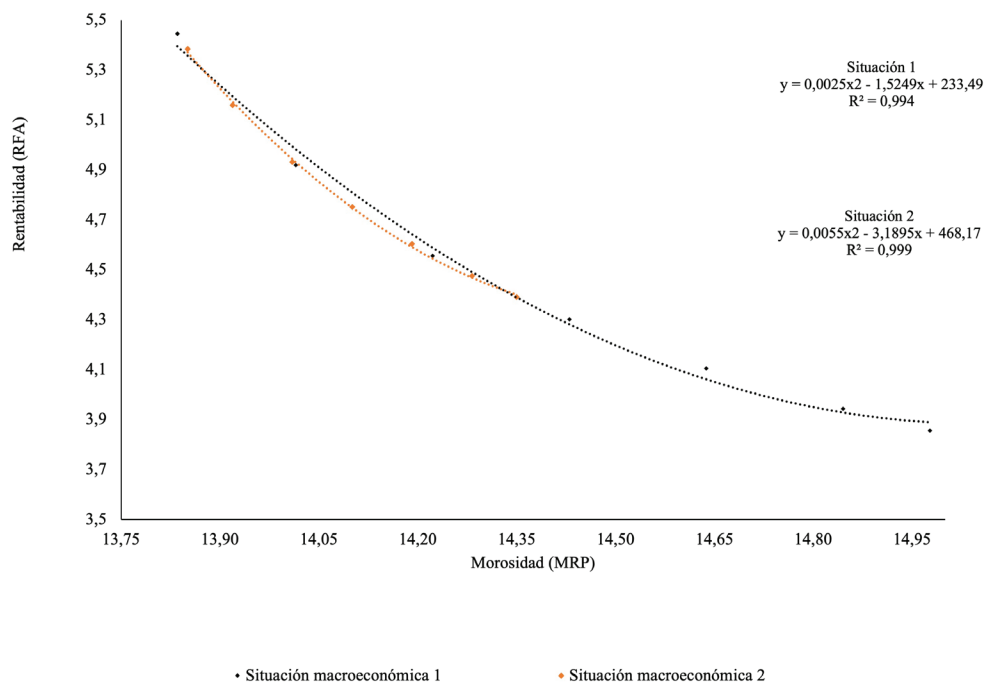


Figura 6. Relación entre la morosidad y la rentabilidad para el escenario pesimista.

Conclusiones

A pesar de que no se presentaron escenarios con niveles de rentabilidad negativos, se cumple con el objetivo de la investigación al evidenciar el efecto que ejercen los aumentos en la morosidad sobre la rentabilidad de la IMF.

La solidez del modelo de negocio se atribuye al “spread” de tasas de interés y el nivel de capital patrimonial, que respaldan la colocación de créditos y proporcionan suficiente solvencia en el flujo de efectivo operativo para soportar incrementos en la morosidad.

Se demostró una relación negativa entre la morosidad y la rentabilidad a través de los métodos de modelación financiera y econométrica, con el apoyo de escenarios prospectivos para la sensibilización de los indicadores. Sin embargo, no se plantearon cambios en las políticas administrativas ante los escenarios macroeconómicos sugeridos, ni situaciones de inestabilidad en todos los agentes económicos del sistema financiero, que podrían generar crisis y desconfianza en las instituciones financieras ante aumentos críticos en la TBP.

Para futuras investigaciones se sugiere plantear análisis y proyecciones anuales, que faciliten el entendimiento de las tendencias de crecimiento en los ciclos económicos. Además de recurrir al criterio de expertos de la gerencia para profundizar en las posibles respuestas de la organización ante diferentes escenarios macroeconómicos.

La mayor limitación de esta investigación recae en que la IMF históricamente ha mantenido un control adecuado sobre la morosidad, sin afrontar problemas críticos que afecten seriamente la rentabilidad. Aun así, se facilita el entendimiento del efecto negativo que genera la morosidad en la rentabilidad de las IMF, y el método propuesto puede replicarse en diferentes negocios con el fin de fortalecer las estrategias y la toma de decisiones empresariales en el manejo de las cuentas por cobrar sobre préstamos e intereses.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de la investigación final del autor correspondiente para la licenciatura en Economía Agrícola y Agronegocios. Se agradece el apoyo a las instancias respectivas en la Universidad de Costa Rica, al proyecto inscrito B05A12 denominado “Modelación econométrica de mercados agrícolas y aplicación de métodos cuantitativos para optimización de procesos en agronegocios”, y especialmente al Sr. Luis Jiménez Padilla por la accesibilidad y la disponibilidad para cooperar con este tipo de investigaciones.

Referencias

- [1] R. Monge, «Financiamiento a la innovación y nuevos emprendimientos», *CR Hoy*, San José, Costa Rica, 20 de mayo de 2021. Accedido: 25 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.crhoy.com/opinion/financiamiento-a-la-innovacion-y-nuevos-emprendimientos/>
- [2] E. Camacho, «Microfinanzas y banca de desarrollo», *CR Hoy*, San José, Costa Rica, 26 de agosto de 2016. Accedido: 20 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.crhoy.com/opinion/microfinanzas-y-banca-de-desarrollo/>
- [3] D. Estrada y A. Hernández, *Situación actual e impacto del microcrédito en Colombia*. Colombia: Banco de la República, 2019. Accedido: 19 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/situacion-actual-e-impacto-del-microcredito-colombia>
- [4] Redcamif, «Microfinanzas de Centroamérica y del Caribe», *Revista Microfinanzas de Centroamérica y del Caribe*, n.º 32, p. 139, 2019.
- [5] L. Ibarra, «Pequeños gigantes: Ránking de las 25 principales instituciones financieras no bancarias de Centroamérica», *El Economista*, 7 de agosto de 2020. Accedido: 25 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.eleconomista.net/economia/Gobierno-salvadoreno-y-el-Banco-Mundial-firman-convenios-por-700-millones-20210525-0011.html>
- [6] El Economista, «Google y BID destinarán \$12.5 millones a las microfinancieras en Latinoamérica», *El Economista*, 17 de febrero de 2021. Accedido: 25 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.eleconomista.net/economia/Panama-acuerda-otros-150-millones-con-el-BID-para-Mipymes-20210525-0013.html>
- [7] Redcamif, «Reporte trimestral de cartera: Escala, alcance y calidad», Reporte trimestral, 2020b. Accedido: 20 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.redcamif.org/>
- [8] M. Flórez-Estrada, «El riesgo aumentó en el sistema financiero durante la pandemia», *Semanario Universidad*, San José, Costa Rica, 27 de abril de 2021. Accedido: 25 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://semanariouniversidad.com/pais/el-riesgo-aumento-en-el-sistema-financiero-durante-la-pandemia/>
- [9] J. Gómez, «Sistematización de la experiencia de la Empresa de Crédito Comunal El Sauce, Turrialba, Costa Rica», Tesis de maestría, CATIE, Cartago, Costa Rica, 2012. Accedido: 22 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/1>
- [10] L. Rodríguez y S. Ruz, «Impacto de la metodología de FINCA Costa Rica en las Empresas de Crédito Comunal», Tesis de maestría, UAM, Madrid, 2009. Accedido: 22 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://fincacostarica.org/estudios/>
- [11] L. Steinhäuser, «Evaluación de impacto de los servicios microfinancieros de Grupo FINCA en la zona de Santa Cruz (Costa Rica)», Tesis de maestría, UAM, Madrid, 2013. Accedido: 22 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.mastermicrofinance.com/Investigacion/Lilian_Steinhauser-Evaluaci%C3%B3n_de_impacto_Grupo_Finca_web_p.pdf
- [12] G. Aguilar y G. Camargo, «Análisis de la morosidad en las instituciones microfinancieras (IMF) en el Perú», *Economía*, vol. 25, n.º 50, pp. 65-121, 2002.
- [13] P. Molyneux y J. Thornton, «Determinants of European bank profitability: A note», *J. Bank. Finance*, vol. 16, n.º 6, pp. 1173-1178, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/0378-4266\(92\)90065-8](https://doi.org/10.1016/0378-4266(92)90065-8).
- [14] E. W. Chirwa, «Determinants of commercial banks' profitability in Malawi: a cointegration approach», *Appl. Financ. Econ.*, vol. 13, n.º 8, pp. 565-571, 2003, doi: <https://doi.org/10.1080/0960310022000020933>.
- [15] A. Constantinou y S. Voyazas, «Determinants of bank profitability: Evidence from the greek banking sector», *Econ. Ann.*, vol. 54, n.º 182, pp. 93-118, 2009, doi: <https://doi.org/10.2298/EKA0982093A>.
- [16] D. Alper y A. Anbar, «Bank specific and macroeconomic determinants of commercial bank profitability: Empirical evidence from Turkey», *Bus. Econ. Res. J.*, vol. 2, n.º 2, pp. 139-152, 2011.

- [17] I. Ayadi y A. Ellouze, «The determinants of the tunisian banking performance: A panel data analysis», *Int. J. Econ. Finance*, vol. 7, n.º 1, pp. 262-272, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.5539/ijef.v7n1p262>.
- [18] C. M. Adrianzen, «La rentabilidad de los bancos comerciales y el ambiente macroeconómico: El caso peruano en el periodo 1982-2014», Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Cataluña, España, 2016. Accedido: 18 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/96389?locale-attribute=es>
- [19] A. Ashebir, «Determinants of profitability study on the selected microfinance in Ethiopia», Tesis de maestría, St. Mary's University, Addis Ababa, Ethiopia, 2017. Accedido: 22 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repository.smuc.edu.et/bitstream/123456789/3150/1/Ashebir%20Ayalew%202017.pdf>
- [20] J. Cabellos y M. Naito, «Determinantes de la rentabilidad de las Instituciones Microfinancieras peruanas en el periodo 2006-2013: Un enfoque según el modelo de Dupont y la teoría de Modigliani-Miller», Tesis de maestría, Universidad del Pacífico, Perú, 2015. Accedido: 18 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.up.edu.pe/handle/11354/1697>
- [21] S. Climent y J. Pavía, «Determinantes y diferencias en la rentabilidad de cajas y bancos», *Rev. Econ. Apl.*, vol. 22, n.º 65, pp. 117-154, 2014.
- [22] Y. Galo y M. Rojas, «Principales determinantes de la rentabilidad en las Instituciones de Microfinanzas de Centroamérica y del Caribe», Redcamif, Estudio sectorial de microfinanzas 3, 2019. Accedido: 25 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.findevgateway.org/sites/default/files/publications/2020/es_estudio_sectorial_no._3_principales_determinantes_de_la_rentabilidad_en_las_imf_de_la_region.pdf
- [23] F. Giménez, «Determinantes de la rentabilidad de bancos comerciales en América Latina», Tesis de maestría, Universidad de San Andrés, Argentina, 2016. Accedido: 18 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10908/12030>
- [24] J. E. Gómez, J. M. Uribe, y H. Piñeros, «Determinantes de la rentabilidad de los bancos en Colombia: ¿Importa la tasa de cambio?», *Rev. Soluciones Postgrado*, vol. 2, n.º 4, pp. 45-64, 2009.
- [25] E. Lizaraburu, G. Gomez, H. Poma, y P. Mejia, «Factores determinantes de la rentabilidad de las instituciones microfinancieras del Perú», *Rev. Espac.*, vol. 41, n.º 25, pp. 348-361, 2020.
- [26] U. Rodrigues, «Factores determinantes de la rentabilidad de los bancos en los países del Mercosur. Un enfoque contable», Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2015. Accedido: 18 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/2240>
- [27] T. A. Tehulu, «Determinants of Financial Sustainability of Microfinance Institutions in East Africa», *Eur. J. Bus. Manag.*, vol. 5, n.º 17, pp. 152-159, 2013, doi: <https://doi.org/10.7176/EJBM>.
- [28] A. Yenesew, «Determinants of financial performance: A study on selected micro finance institutions in Ethiopia», Tesis de maestría, Jimma, Etiopía, 2014. Accedido: 20 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/handle/20.500.12413/5467>
- [29] G. Jara, S. Sánchez, R. Bucaram, y J. García, «Análisis de indicadores de rentabilidad de la pequeña banca privada en el Ecuador a partir de la dolarización», *COMPENDIUM*, vol. 5, n.º 12, pp. 54-76, 2018.
- [30] R. Cermeño, J. León, y G. Mantilla, «Determinantes de la morosidad: Un estudio panel para el caso de las cajas municipales de ahorro y crédito del Perú, 2003-2010», Centro de Investigación y Docencia Económicas, México DF, México, Documento de trabajo 513, 2011. Accedido: 25 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11651/950>
- [31] R. Chavarín, «Morosidad en el pago de créditos y rentabilidad de la banca comercial en México», *Rev. Mex. Econ. Finanz. Nueva Época*, vol. 10, n.º 1, pp. 71-83, 2015.
- [32] P. Athanasoglou, S. Brissimis, y M. Delis, «Bank-specific, industry-specific and macroeconomic determinants of bank profitability», Bank of Greece, Greece, Working paper 25, 2005. Accedido: 20 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://mpa.ub.uni-muenchen.de/32026/>
- [33] F. Portocarrero y A. Tarazona, «Determinantes de la rentabilidad en las Cajas Rurales de Ahorro y Crédito», Lima, Perú, 2003, p. 73. Accedido: 22 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.findevgateway.org/es/publicacion/2003/06/determinantes-de-la-rentabilidad-en-las-cajas-rurales-de-ahorro-y-credito-crac>
- [34] P. Muriu, «Microfinance profitability», Tesis doctoral, University of Birmingham, Birmingham, Reino Unido, 2011. Accedido: 20 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/40021581.pdf>
- [35] E. Trigo, «Análisis y medición del riesgo de crédito en carteras de activos financieros ilíquidos emitidos por empresas», Tesis doctoral, Universidad de Málaga, Málaga, España, 2009. Accedido: 18 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/4068>

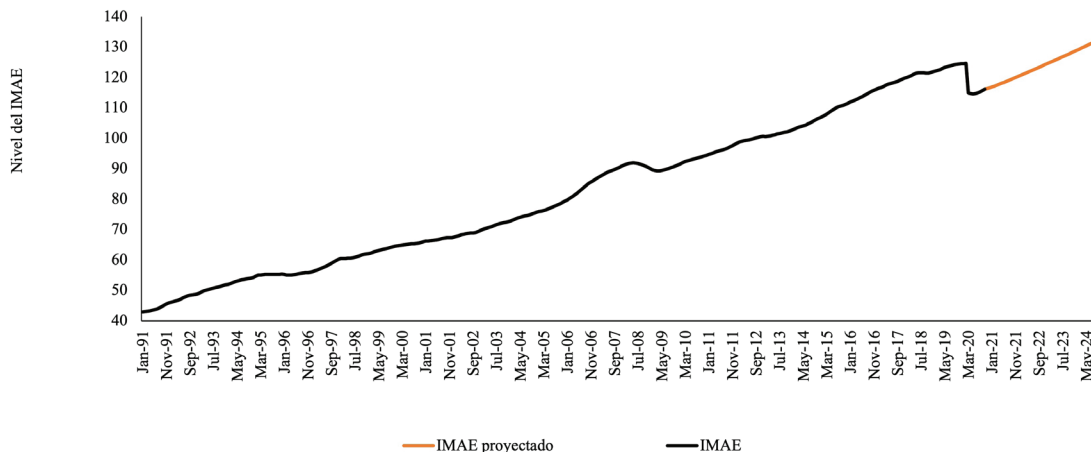
- [36] M. Ugando, Á. R. Sabando, Á. E. Zapata, A. Villalón, y B. X. Sabando, «Modelación financiera y pronósticos de fondos externos requeridos en el contexto de las pymes de Santo Domingo De Los Tsáchilas, caso Ecuador», *Sinapsis*, vol. 11, n.º 2, pp. 65-78, 2019.
- [37] R. A. Terrazas, «Modelo de gestión financiera para una organización», *Perspectivas*, n.º 23, pp. 55-72, 2009.
- [38] J. I. Jimenez, F. S. Rojas, y H. J. Ospina, «La planeación financiera: Un modelo de gestión en las MIPYMES», *FACE*, vol. 13, pp. 137-150, 2013.
- [39] G. Rubio y M. Rodríguez, «Valoración de marcas a través de modelos financieros. Una aplicación a Melia Hotels International», *Cuad. Estud. Empres.*, vol. 26, pp. 125-153, 2016, doi: <https://doi.org/10.5209/CESE.54164>.
- [40] S. Benninga, *Financial Modeling*, 4.ª ed. London, England: Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [41] A. Scherk, *Manual de análisis fundamental*, 5.ª ed. Madrid, España: Inversor Ediciones, 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.montartuempresa.com/wp-content/uploads/2015/10/manual_analisis_fundamental.pdf
- [42] J. M. Castillo, «El análisis prospectivo: Un reto tecnológico», Boletín informativo 321, 2011. Accedido: 15 de febrero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3970357>
- [43] A. Damodaran, «Value and risk: Beyond betas», *Financ. Anal. J.*, vol. 61, n.º 2, pp. 38-43, 2003.
- [44] R. Pérez, *Modelación financiera. Conceptos y aplicaciones*. Bogotá, Colombia: Universidad Piloto de Colombia, 2019. Accedido: 14 de febrero de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.unipiloto.edu.co/descargas/Modelacion-Financiera_Concep-Aplicaciones.pdf
- [45] G. Reyes y A. Briceño, «Propuesta de modelo financiero para crecimiento corporativo sostenible», *Finanz. Política Económica*, vol. 2, n.º 2, pp. 57-65, 2010.
- [46] L. A. Otero y P. Durán, «Diseño de un modelo de análisis financiero dinámico (DFA) aplicado al seguro de automóvil español», *Rev. Eur. Dir. Econ. Empresa*, vol. 17, n.º 4, pp. 63-84, 2008.
- [47] H. O. Landa, «Restricción financiera y crecimiento económico en México», *Investig. Económica*, vol. 78, n.º 309, pp. 27-57, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.22201/fe.01851667p.2019.309.70118>.
- [48] M. M. Moso y F. López, «Relación de equilibrio en la morosidad y el deterioro de la cartera de hipotecas bur-satilizadas en México», *Rev. Investig. En Cienc. Contab. Adm.*, vol. 5, n.º 1, pp. 3-31, 2019.
- [49] L. Gitman y C. Zutter, *Principios de administración financiera*, 12.ª ed. México: Pearson Educación, 2012.
- [50] R. Minzer, «Las instituciones microfinancieras en América Latina: Factores que explican su desempeño», CEPAL, Mexico, Documento de trabajo 128, 2011. Accedido: 24 de enero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/4910-instituciones-microfinancieras-america-latina-factores-que-explican-su-desempeno>
- [51] D. N. Gujarati y D. C. Porter, *Econometría*, 5ta ed. Mexico: McGraw-Hill Education, 2010.
- [52] T. Bellotti y J. Crook, «Credit scoring with macroeconomic variables using survval analysis», *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 60, n.º 12, pp. 1699-1707, 2009, doi: <https://doi.org/10.1057/jors.2008.130>.
- [53] F. Clavijo-Ramírez, «Determinantes de la morosidad de la cartera de microcrédito en Colombia», *Borradores Econ.*, n.º 951, pp. 1-44, 2016.
- [54] A. A. Loyaga, «Factores determinantes de la morosidad en el sector microfinanciero peruano para el período Enero 2000 - Setiembre 2014», Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú, 2016. Accedido: 30 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/5156>
- [55] G. A. Rivera, «Determinantes de la calidad de cartera en las microfinancieras de Perú, 2006-2012: Un análisis de regresión cuantílica con datos de panel», Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2020. Accedido: 22 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/16791>
- [56] BCCR, «Indicadores económicos», *BCCR: Banco Central de Costa Rica*, 2020a. <https://www.bccr.fi.cr/seccion-indicadores-economicos/indicadores-econ%C3%B3micos>
- [57] V. Badilla, «El virus que paralizó la economía de Costa Rica y el mundo entero», *Delfino.cr*, San José, Costa Rica, 13 de noviembre de 2020. Accedido: 19 de febrero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://delfino.cr/2020/11/el-virus-que-paraliza-la-economia>
- [58] BCCR, «Comunicado de política monetaria N° 2-2019», *BCCR: Noticias*, 2019a. <https://www.bccr.fi.cr/seccion-noticias/noticias/> (accedido 21 de octubre de 2020).

[59] L. Jiménez, «¿Estamos a las puertas de una nueva crisis en Costa Rica?», *La Nación*, San José, Costa Rica, 9 de septiembre de 2018. Accedido: 19 de febrero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.nacion.com/revista-dominical/estamos-a-las-puertas-de-una-nueva-crisis-en/BKBMDZS4PRH43DSPCNZB3XCPL/story/>

Anexos

Anexo 1. Modelos econométricos de la TBP y el IMAE.

Tipo de modelo	Variable dependiente	Variable independiente	Coef. Regresión	Valor p	
ARIMA [(1,2,11,24),2,(1,2,11,24)]	I_TBP	Constante	-2,05E-05	1E-03	***
		phi_1	0,036	0,78	
		phi_2	0,118	1E-03	***
		phi_11	0,113	1E-03	***
		phi_24	0,120	1E-03	***
		theta_1	-0,919	7E-12	***
		theta_2	-0,096	0,48	
		theta_11	-0,023	0,21	
		theta_24	0,038	1E-03	***
		R ²	0.996		
		R ² ajustado	0.996		
		CIA	-2476,741		
		CIB	-2429,277		
ARIMA (1,1,1)	I_IMAE	Constante	0,003	2,4E-08	***
		phi_1	0,822	3,8E-027	***
		theta_1	-0,640	3,9E-010	***
		R ²	0,999		
		R ² ajustado	0,999		
		CIA	-2813,275		
		CIB	-2797,753		



Anexo 2. Evolución del IMAE histórico y proyectado, 1991-2024. Fuente: Elaboración propia con datos de [56].

Condición nutricional de cultivos en sistemas de producción agroforestal con Palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)¹



Nutritional status of crops in agroforestry production systems with African Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Parménides Furcal-Beriguete², Zeydi Robles-Argüello³, Ricardo Salazar-Díaz⁴

Fecha de recepción: 14 de diciembre, 2021
Fecha de aprobación: 2 de abril, 2022

Furcal-Beriguete, P; Robles-Argüello, Z; Salazar-Díaz, R.
Condición nutricional de cultivos en sistemas de producción
agroforestal con palma africana (*Elaeis guineensis* jacq.).
Tecnología en Marcha. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág.
75-85.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5902>

- 1 Este trabajo forma parte del proyecto de investigación Modelación de producción, protección y evaluación económica de cultivos en sistemas agroforestales de cacao en Osa y Golfito, código 1431031, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, TEC.
- 2 Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones y Desarrollo en Agricultura Sostenible del Trópico Húmedo (CIDASTH), Campus Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: pafurcal@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8695-4523>
- 3 Escuela de Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: zeydyrobles@gmail.com
- 4 Escuela de Agronegocios, Centro de Investigación y Gestión Agroindustrial (CIGA), Campus Central, Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: risalazar@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1954-0133>

Palabras clave

Contenido de nutrientes en hojas; absorción de nutrientes; sistema agroforestal; *Cordia megalantha*; *Theobroma cacao*; Musa sp.

Resumen

El objetivo fue evaluar el estado nutricional de los cultivos de un sistema agroforestal (SAF), del monocultivo *Elaeis guineensis* y la absorción de nutrientes de *Cordia megalantha* a la edad de dos años. Se muestrearon cinco parcelas de tres años de edad establecidas por la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO) en diferentes localidades en la región sur de Costa Rica. Cada parcela constaba con dos tratamientos: un SAF integrado por *E. guineensis*, *C. megalantha*, *T. cacao* y Musa sp, y el monocultivo de *E. guineensis*. En dos ocasiones (2019 y 2020), en cada parcela se muestreó hojas y frutos en cinco plantas seleccionadas al azar en los cultivos, para determinar contenido de nutrimentos; en *C. megalantha* se midieron solamente tres árboles, obteniéndose, además el crecimiento anual; sin embargo, para obtener el rendimiento unitario de madera, usado en la absorción de nutrientes, se midió alrededor del 50% de los árboles plantados (42 árboles/ha). Los resultados fueron analizados estadísticamente con las parcelas como bloques, donde la variable estado nutricional de *E. guineensis* en los dos tratamientos no mostró diferencias significativas, en este cultivo los nutrientes deficientes recurrentes en las hojas fueron el Zn y el K. En tanto, *T. cacao* y Musa sp. presentaron mayores deficiencias en el contenido de Ca-Mg-Zn y K-Zn respectivamente. Se estimó que, en promedio, una hectárea de *C. megalantha* de dos años de edad extrajo en kg: 3,04 de Ca; 3,04 de N; 1,95 de K; 0,48 kg de Mg y 0,23 kg de P.

Keywords

Nutrient content in leaves; nutrient absorption; agroforestry system; *Cordia megalantha*; *Theobroma cacao*; Musa sp.

Abstract

The objective was to evaluate the nutritional status of the crops of an agroforestry system (SAF), of the monoculture *Elaeis guineensis* and the absorption of nutrients from *Cordia megalantha* at the age of two years. Five three-year-old plots established by the Initiative Osa & Golfito (INOGO) were sampled in different locations in the southern region of Costa Rica. Each plot consisted of two treatments: a SAF composed of *E. guineensis*, *C. megalantha*, *T. cacao* and Musa sp, and the monoculture of *E. guineensis*. On two occasions (2019 and 2020), in each plot leaves and fruits were sampled on five plants randomly selected in the crops, to determine nutrient content; in *C. megalantha* only three trees were measured, obtaining, in addition, the annual growth; however, to obtain the unit yield of wood, used in nutrient absorption, about 50% of the trees planted were measured (42 trees/ha). The results were statistically analyzed with the plots as blocks, where the variable nutritional status of *E. guineensis* in the two treatments showed no significant differences, in this crop the recurrent deficient nutrients in the leaves were Zn and K. Meanwhile, *T. cacao* and Musa sp. had greater deficiencies in the content of Ca-Mg-Zn and K-Zn respectively. It was estimated that, on average, one hectare of *C. megalantha* aged two years extracted in kg: 3.04 ca; 3.04 of N; 1.95 K; 0.48 kg of Mg and 0.23 kg of P.

Introducción

En Costa Rica, la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) es el segundo cultivo perenne con mayor área sembrada, aproximadamente 76.910 hectáreas se encuentran dedicadas a su producción, con un alcance en el 2018 de 1 087 800 tm [1], y una exportación del 65% de

la producción de aceite [2], principalmente a México. En la región Brunca, el cultivo de *E. guineensis* tiene gran importancia e impacto en los sectores económico, social y ambiental [3]; en esta zona se concentra el 68% del área cultivada a nivel nacional [2]. En los cantones de Osa y Golfito es el principal cultivo agrícola en producción. sin embargo, el monocultivo en el que se produce y su expansión es vista por los ambientalistas como una amenaza [3].

El monocultivo es una práctica que contribuye al deterioro del suelo tanto físico, químico como biológico. En el cultivo de *E. guineensis* los problemas más comunes son el daño a la estructura del suelo que causa compactación lo que genera mayor escorrentía superficial [4], intensificando la pérdida de nutrientes y materia orgánica a causa de la erosión. Esta pérdida tiene influencia en la expresión fenotípica y rendimiento de los cultivos.

La situación descrita permite establecer modelos más estables, entre ellos, los sistemas agroforestales representan una oportunidad para reducir el impacto ambiental del monocultivo de *E. guineensis*. Sin embargo, no es posible generalizar debido a que el impacto en servicios ambientales (liberación de biomasa, reciclaje y uso eficiente de nutrientes, fijación y almacenamiento de carbono, mejora en la infiltración del agua, conservación de la biodiversidad, entre otros) depende de las características de cada sitio y los cultivos presentes en cada sistema, de manera que la presente investigación se manifiesta interesante, ya que contribuye a generar conocimiento sobre interacciones biológicas y nutricionales en la producción de *E. guineensis* y demás cultivos dentro de un sistema agroforestal.

Esta investigación forma parte de la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO), que plantea desarrollar una estrategia para el desarrollo humano sostenible y la gestión ambiental en los cantones de Osa y Golfito de Costa Rica. El núcleo de acción es una colaboración entre actores de la región e instituciones públicas y privadas en Estados Unidos y Costa Rica, facilitado por el Stanford Woods Institute for the Environment de la Universidad de Stanford [3]. El Laboratorio Experimental de Palma Africana (LAPA) forma parte de esta iniciativa, investigando el impacto de entremezclar la *E. guineensis* con *Musa* sp., *Cordia megalantha* y *Theobroma cacao*, con el fin de determinar la capacidad de este sistema de compensar la pérdida de biodiversidad que ocurre en las plantaciones tradicionales. De manera que el objetivo de esta investigación fue evaluar el estado nutricional de los cultivos que conforman el sistema agroforestal (*E. guineensis* con *Musa* sp., *Cordia megalantha* y *Theobroma cacao* y la extracción de nutrientes de *C. megalantha* a una edad específica en el proyecto LAPA en los cantones de Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica.

Materiales y métodos

Localización del estudio

El área en estudio estuvo conformada de cinco parcelas ubicadas en las localidades de Chacarita, Piedras Blancas, Rancho Quemado, La Palma y La Guaria; las tres primeras pertenecen al cantón de Golfito, mientras que las dos últimas se localizan en el cantón de Osa, ambos en la provincia de Puntarenas, Costa Rica. Estas fueron establecidas y conducidas por el Laboratorio Experimental de Palma Africana Sostenible (LAPA) de la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO).

El cantón de Golfito se localiza en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano y el cantón de Osa en Bosque Muy Húmedo Tropical [5], presentan altas precipitaciones con promedios mensuales de 347,7 mm y 334,0 mm y altas temperaturas con rangos de 23,5 °C a 29,2 °C en Golfito y para la localidad de Piedras Blancas la precipitación promedio es de 509,9 mm y rango de temperatura de 21,9°C a 31,8 °C en Río Claro [6].

Los órdenes de suelos son Ultisoles principalmente, además asociación Entisoles-Inceptisoles e Inceptisoles, según el mapa de suelos de Costa Rica [7], figura 1.

Los trabajos de campo se iniciaron en el primer semestre del año 2019 y finalizaron en noviembre de 2020. Las parcelas fueron establecidas en el año 2016, principalmente entre los meses de agosto a octubre, con la siembra de todos los cultivos, excepto las plántulas de *C. megalantha* y la parcela en Chacarita que se establecieron en el año 2017.

Se tomaron muestras de suelos para conocer la fertilidad química a través de análisis con las soluciones extractoras KCl y Olsen Modificado. La acidez fue determinada por valoración con NaOH y el Al con HCl; el P y S por colorimetría con el Analizador de Inyección de Flujo (FIA) y el resto de los elementos por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

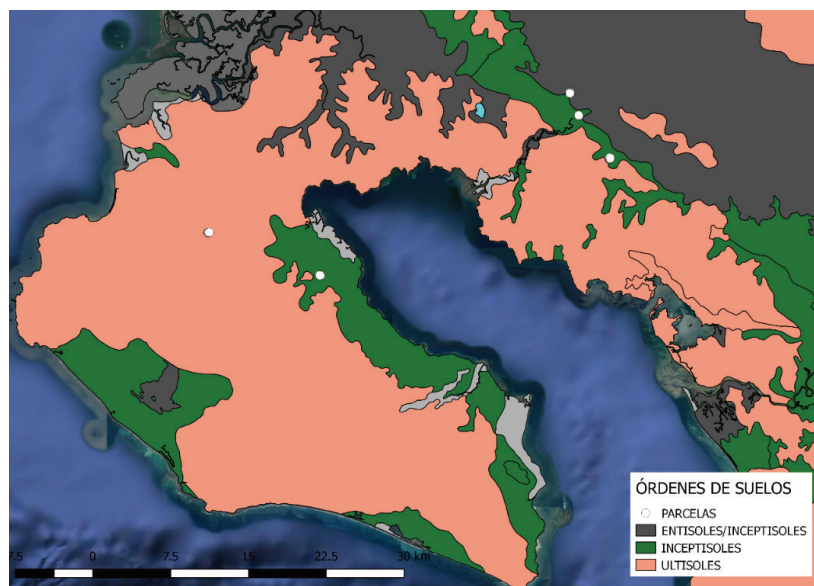


Figura 1. Órdenes de suelos presentes en las parcelas del proyecto LAPA, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. Fuente: Elaborado con base en CIA 2020.

Para las variables nutricionales se tomaron cinco plantas seleccionadas al azar de cada cultivo, excepto de *C. megalantha* que se midieron en tres árboles.

En *E. guineensis* se determinó materia seca y contenido nutricional en la hoja Nº 9 según la metodología descrita por [8]. Para *T. cacao* y *C. megalantha* se cosechó la tercera y cuarta hoja de ramas en los cuatro lados del árbol [9]. En *Musa* sp. se cosechó una parte del tercio medio de la lámina de la tercera hoja abierta más joven de plantas en floración o próximas a floración [10].

El estado nutricional en *E. guineensis* se evaluó con la guía de concentración de nutrientes (hoja Nº 17) de palmas jóvenes menores de 6 años según von Uexküll y Fairhurst, citado por [11]. Mientras que en *T. cacao* se realizó mediante la guía de rangos definidos por Abreu, citado por [12] y para las musáceas se utilizó la guía utilizada por CORBANA S.A., citada por [13].

Variabes de rendimiento de *C. megalantha*

Se cosechó madera de ramas en los cuatro lados del árbol, además se midió la altura desde la base del tronco hasta la copa y la circunferencia del tallo tomado a 1,30 m de altura. Luego se calculó el diámetro a la altura del pecho (DAP), y a partir de este y la altura en *C. megalantha* se obtuvo el volumen de árboles en pie, según la fórmula: $V = \frac{1}{4} \pi D^2 h f$, donde f es el factor de forma ($f=0,5$).

Además, se calcularon las siguientes variables: incremento medio anual en diámetro (IMAD), en altura (IMAH) y en volumen (IMAV). El IMA es obtenido por la división del mayor valor actual de la variable considerada (diámetro, altura, volumen), entre la edad del árbol [14].

Diseño experimental y arreglo de tratamientos

El experimento constó de cinco parcelas con dos tratamientos cada una, sistema agroforestal (SAF) y monocultivo de palma, con un área de 5 000 m² cada tratamiento. Estos fueron un SAF que combinó *E. guineensis* sembrada 9 m x 12 m para un total de 93 plantas/ha, *C. megalantha* (42 árboles/ha), *T. cacao* (632 árboles/ha) y *Musa* sp. (plátano, banano o cuadrado) (976 plantas/ha) y un control con *E. guineensis* en diseño “tresbolillo” con 9 m x 9 m.

Se utilizó un Diseño de Parcelas Divididas con Bloqueo, con dos tratamientos y cinco repeticiones (localidades) por tratamiento. El factor A correspondió a cada parcela (cinco), el factor B correspondió a dos tratamientos dentro de cada parcela. Se usó la prueba de comparación de medias DGC (Di Rienzo, Guzmán y Casanoves), con un nivel de significancia de 0,05 [15].

Resultados

Estado nutricional de los cultivos dentro del proyecto y extracción de nutrientes en madera de laurel (*C. megalantha*)

La concentración de nutrientes en las hojas de palma africana de aceite, tanto en sistemas agroforestales (SAF) como en monocultivo, para dos años consecutivos se visualizan en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Concentración de nutrientes en hojas Nº 9 de *E. guineensis* en monocultivo de las cinco localidades del proyecto LAPA, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. 2019 – 2020.

Sistema	Elemento		Piedras Blancas	Chacarita	La Guaria	Rancho Quemado	La Palma	Media
Monocultivo 2019	Nt	%	2,56 O	2,89 O	2,76 O	2,76 O	3,00 O	2,79
	K		1,20 O	0,98 D	0,94 D	0,63 D	0,60 D	0,87
	Ca		0,74 E	0,79 E	0,68 O	0,79 E	0,60 O	0,72
	Mg		0,17 D	0,25 O	0,36 O	0,43 O	0,34 O	0,31
	P		0,15 D	0,17 O	0,18 O	0,15 D	0,16 O	0,16
	Zn	mg/L	10 D	9 D	9 D	14 D	8 D	10,00
	Fe		67	62	52	79	54	62,80
	Mn		53	139	122	384	101	159,8
	Cu		4 O	4 O	2 D	7 O	6 O	4,60
Monocultivo 2020	Nt	%	2,74 O	2,64 O	2,63 O	2,58 O	2,42 D	2,60
	K		0,61 D	0,60 D	0,57 D	0,63 D	0,81 D	0,64
	Ca		0,89 E	0,67 O	0,73 E	0,73 E	0,56 O	0,72
	Mg		0,16 D	0,23 O	0,25 O	0,47 E	0,39 O	0,30
	P		0,18 O	0,17 O	0,16 O	0,14 D	0,15 D	0,16
	Zn	mg/L	7 D	6 D	7 D	14 D	11 D	9,00
	Fe		58	62	62	52	49	56,60
	Mn		56	112	122	298	169	151,4
	Cu		6 O	6 O	7 O	10 E	11 E	8,00

Nota: D, Deficiente; O, Optimo; E, Exceso. Datos sin letras no tienen punto de comparación. Adaptado de Fairhurst y Mutert 1999.

Cuadro 2. Concentración de nutrientes en hojas Nº 9 de *E. guineensis* en el SAF de las cinco localidades del proyecto LAPA, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. 2019 – 2020.

Sistema	Elemento		Piedras Blancas	Chacarita	La Guaria	Rancho Quemado	La Palma	Media
SAF 2019	Nt	%	2,72 O	2,77 O	2,65 O	3,07 O	2,87 O	2,82
	K		0,58 D	0,72 D	0,86 D	0,59 D	0,76 D	0,70
	Ca		0,82 E	0,82 E	0,79 E	0,90 E	0,55 O	0,78
	Mg		0,15 D	0,21 O	0,29 O	0,50 E	0,35 O	0,30
	P		0,15 D	0,39 E	0,16 O	0,17 O	0,15 D	0,20
	Zn	mg/L	9 D	9 D	18 O	12 D	11 D	11,80
	Fe		62	58	51	77	65	62,60
	Mn		35	63	74	392	133	139,4
	Cu		2 D	3 D	1 D	6 O	7 O	3,80
SAF 2020	Nt	%	2,73 O	2,66 O	2,53 O	2,54 O	2,52 O	2,60
	K		0,60 D	0,68 D	0,55 D	0,58 D	0,83 D	0,65
	Ca		0,85 E	0,92 E	0,70 O	0,70 O	0,51 O	0,74
	Mg		0,16 D	0,20 O	0,25 O	0,42 O	0,37 O	0,28
	P		0,18 O	0,17 O	0,17 O	0,15 D	0,15 D	0,16
	Zn	mg/L	5 D	6 D	7 D	13 D	9 D	8,00
	Fe		47	43	47	52	45	46,80
	Mn		32	74	90	300	182	135,6
	Cu		5 O	5 O	5 O	12 E	10 E	7,40

Nota: D, Deficiente; O, Optimo; E, Exceso. Datos sin letras no tienen punto de comparación.

Cuadro 3. Concentración de nutrientes en hoja Nº 3 de *T. cacao* en las cinco localidades del proyecto LAPA, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. 2019 – 2020.

Sistema	Elemento		Piedras Blancas	Chacarita	La Guaria	Rancho Quemado	La Palma	Media
SAF 2019	Nt	%	1,97 O	2,14 O	1,97 O	2,17 O	2,06 O	2,06
	K		1,29 A	1,85 A	1,54 A	1,12 O	1,19 O	1,40
	Ca		1,60 B	1,05 B	1,64 B	1,03 B	1,03 B	1,27
	Mg		0,34 B	0,34 B	0,43 B	0,54 B	0,55 B	0,44
	P		0,18 A	0,19 A	0,16 A	0,17 A	0,16 A	0,17
	Zn	mg/L	27 B	24 B	35 O	21 B	43 O	30,00
	Fe		58 O	47 O	72 A	69 A	44 O	58,00
	Mn		176 B	175 B	411 O	536 A	655 A	390,6
	Cu		6 O	4 B	4 B	9 A	8 O	6,20
SAF 2020	Nt	%	1,81 O	2,01 O	1,73 O	2,08 O	1,64 O	1,85
	K		1,08 O	1,41 A	1,17 O	0,75 O	0,80 O	1,04
	Ca		1,71 O	1,44 B	1,35 B	1,09 B	1,19 B	1,36
	Mg		0,38 B	0,40 B	0,51 B	0,69 O	0,64 O	0,52
	P		0,16 A	0,20 A	0,21 A	0,16 A	0,15 A	0,18
	Zn	mg/L	37 O	30 B	35 O	15 B	49 O	33,20
	Fe		55 O	41 O	48 O	63 O	52 O	51,80
	Mn		387 O	251 O	255 O	590 A	700 A	436,6
	Cu		6 O	9 A	7 O	11 A	8 O	8,20

Nota: D, deficiente; O, óptimo; A, alto. Basado en los rangos Adaptados de Puentes et al. 2016.; Nt, nitrógeno total.

Los resultados de los análisis químicos de hojas del cultivo de cacao se muestran en el cuadro 3, de igual modo los valores promedios de musáceas y laurel negro para los dos años de estudios de las cinco parcelas experimentales se pueden observar en el cuadro 4, excepto para musáceas en las parcelas de La Palma y Rancho Quemado en el año 2019, año que al momento del muestreo las plantas aún no se encontraban en la edad próximo a floración propuesta para los análisis.

Cuadro 4. Concentración promedio y desviación estándar de nutrientes en las hojas y madera de laurel y hojas de musáceas, en Sistema Agroforestal (SAF) de las cinco localidades del proyecto LAPA, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. 2019 – 2020.

			Nt	K	Ca	Mg	P	Zn	Fe	Mn	Cu
			%					mg/L			
Hojas	2019	Media	2,44	2,00	3,04	0,59	0,22	12,4	66,6	54,4	15,4
		Dest	0,283	0,337	0,228	0,244	0,06	1,497	15,907	28,682	2,154
	2020	Media	2,14	1,80	3,49	0,58	0,30	10,2	59,4	29,4	18,4
		Dest	0,224	0,532	0,457	0,191	0,129	1,166	11,128	10,726	2,728
Madera	2019	Media	0,92	1,07	1,31	0,17	0,17	11,6	11,6	13,8	9,6
		Dest	0,253	0,248	0,301	0,032	0,047	2,683	2,683	4,561	1,789
	2020	Media	0,92	1,26	2,04	0,23	0,21	16,0	16,0	9,00	17,2
		Dest	0,812	0,13	0,24	0,116	0,066	2,828	2,828	1,571	3,715
Musáceas	2019	Media	2,94	3,00	0,82	0,20	0,21	9,3	75,0	214	4,00
		Dst	0,537	0,566	0,261	0,058	0,042	1,247	9,626	33,49	2,16
	2020	Media	2,5	2,63	0,54	0,25	0,21	7,4	82,2	287,2	8,6
		Dst	0,466	0,774	0,165	0,053	0,052	1,497	15,892	81,14	1,96

Nota: Dest., desviación estándar; Nt, nitrógeno total

A los dos y tres años de establecidos los árboles de *C. megalantha*, se hicieron mediciones en tres árboles de cada parcela, los valores de diámetro, altura y volumen, y los resultados obtenidos de incremento anual en estas variables se presentan en el cuadro 5.

Cuadro 5. Promedio del diámetro, altura, volumen y el incremento medio anual (IMA) de *C. megalantha* en las cinco parcelas de evaluación en el SAF, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. 2019-2020.

Localidad	DAP (cm)	IMAD (cm)	Altura (m)	IMAH (m)	Volumen (m ³)	IMAV (m ³)
2019						
Piedras Blancas	8,16	4,08	4,31	2,16	0,014	0,007
Chacarita	8,21	4,11	4,48	2,24	0,015	0,007
La Guaria	4,55	2,28	4,39	2,19	0,004	0,002
Rancho Quemado	9,89	4,94	4,63	2,31	0,019	0,009
La Palma	7,79	3,89	4,60	2,30	0,012	0,006
Promedio	7,72	3,86	4,48	2,24	0,013	0,006
2020						
Piedras Blancas	15,31	5,10	7,11	2,37	0,090	0,045
Chacarita	16,17	5,39	8,17	2,72	0,085	0,042
La Guaria	7,81	2,60	5,20	1,73	0,013	0,007
Rancho Quemado	17,20	5,73	8,33	2,78	0,104	0,052
La Palma	13,01	4,34	7,12	2,37	0,050	0,025
Promedio	13,90	4,63	7,19	2,39	0,068	0,034

Nota: DAP, Diámetro a la Altura del Pecho. IMAD, Incremento Medio Anual del Diámetro. IMAH, Incremento Medio Anual de la Altura. IMAV, Incremento Medio Anual del Volumen.

Se realizó una estimación de la absorción de nutrientes por el fuste del árbol de *C. megalantha*, a partir de la productividad en volumen de madera comercial en el año 2019, el porcentaje de materia seca de madera y la concentración de nutrientes en este porcentaje, y la densidad de siembra, se observa que la extracción está supeditada mayormente a la productividad (cuadro 6).

Cuadro 6. Estimación de la cantidad de nutrimentos extraídos por el fuste de *C. megalantha* por hectárea y productividad promedio por volumen del cultivo en las condiciones de las cinco parcelas de evaluación en el SAF, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. 2019 – 2020.

Localidad	Nt	K	Ca	Mg	P	Mn	Zn	Cu	Fe	Árboles ha ⁻¹	Materia seca	Volumen unitario*
	kg/ha					gr/ha					(%)	
P.Blancas	0,39	0,72	1,02	0,09	0,09	0,96	0,78	0,54	4,28	42	41,00	0,0035
Chacarita	2,86	3,53	4,47	0,54	0,43	3,21	4,28	2,68	27,82	42	35,39	0,0180
La Guaría	0,34	0,6	0,6	0,05	0,13	0,58	0,53	0,34	2,37	42	38,41	0,0030
Rancho Q	11,38	4,67	8,84	1,64	0,49	18,01	5,73	7,37	6,15	42	37,49	0,0520
La Palma	0,21	0,25	0,27	0,05	0,03	0,18	0,28	0,33	1,59	42	38,41	0,0016
Promedio	3,03	1,95	3,04	0,48	0,23	4,59	2,32	2,25	8,44	42	38,14	0,01562

*Obtenido por M. Guevara (2019) y L. Mack (2019), a partir de árboles de 2 años de edad con un mínimo de 1,30 m de altura. Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica; Nt, nitrógeno total.

Discusión

Estado nutricional de Palma Africana (*Elaeis guineensis*)

El estado nutricional del cultivo de *E. guineensis* no mostró diferencias significativas (p-valor \geq 0,05) entre tratamientos. En palmas mayores de cuatro años después de la siembra, el muestreo se realiza en la hoja Nº 17, en cambio en menores de cuatro años como las de este estudio, el muestreo se hace en la hoja Nº 9 debido a la tasa de crecimiento en plantas jóvenes y la hoja Nº 17 puede tener solamente de cinco a seis meses de edad [8]. Por lo tanto, es aconsejable referirse a rangos óptimos en lugar de valores críticos en este cultivo [11]. La secuencia común de concentración de elementos mayores en *E. guineensis* fue N>Ca>K>Mg>P.

El contenido de nitrógeno total (Nt) se muestra óptimo en todas las localidades tanto en monocultivo como en SAF, excepto en la localidad La Palma en monocultivo en el 2020; el promedio fue de 2,60% a 2,82% (Cuadros 1 y 2). [16] menciona que varios investigadores reportan como nivel óptimo 2,5% para la hoja Nº 17 y 2,7 % para la hoja Nº 9.

El K mostró un contenido promedio de 0,64% y 0,87% en el monocultivo, y de 0,65% y 0,7% en el SAF, deficiente en ambos tratamientos, excepto en la parcela Piedras Blancas en monocultivo. Las consultas hechas por [16] reportan como nivel óptimo el valor de 1,0% de potasio en la hoja Nº 17 y de 1,25% para la hoja Nº 9. Esta deficiencia en *E. guineensis* podría estar relacionada por la falta de absorción del K, debido al efecto antagónico entre el magnesio y el potasio [17], en este estudio se encontró que el K está desbalanceado respecto al Ca y al Mg.

La concentración promedio de Ca fue de 0,7% a 0,78% para ambos tratamientos, clasificado como excesivo y alto, el rango óptimo es de 0,5% a 0,7% para la hoja Nº 17 en plantación menor a cuatro años, según von Uexküll y Fairhurst, citado por [11]. El alto contenido de calcio en las hojas puede ser debido a que en los resultados de análisis de suelos fueron altos, de

acuerdo a los niveles propuesto por [18]. El estado óptimo de Ca en las hojas es importante en *E. guineensis*, ya que según Nair y Sreedharan citado por [19] el contenido de Ca en la hoja Nº 17 se correlaciona positivamente con el número de inflorescencias femeninas y con el peso de fruto fresco. El contenido promedio de Mg en este estudio fue de 0,3% (Cuadros 1 y 2), encontrándose deficiente únicamente en la localidad de Piedras Blancas, muy probable por el exceso de Ca respecto al Mg, cuyo valor mínimo fue de 14,21 y rango óptimo es de 2 a 5 [18].

Respecto al P, [11] reportan como rango óptimo de 0,16 % a 0,19 % en la hoja Nº 17 para planta menor de seis años y 0,16% para la hoja Nº 9 [16], por los valores obtenidos (Cuadros 1 y 2) Rancho Quemado y La Palma son los de patrón deficientes, quizás porque los suelos en esas dos localidades son los más deficientes en este elemento. Otro elemento con deficiencia generalizada en las hojas es el Zn, es posible que se deba a esa misma condición en el suelo y al patrón predominante de Ca alto en otras localidades.

Estado nutricional de *T. cacao*, *musa sp* y *C. megalantha*

En cacao (*Theobroma cacao*), para Nt se mantuvo óptimo en los dos años, mientras, mientras que el K tuvo una variación de adecuado a alto tanto en el 2019 como en el 2020 y P foliar mantuvo un comportamiento alto (Cuadro 3), esta especie al parecer es eficiente en la toma de P, dado que este elemento es deficiente en el suelo de todas las localidades, además que puede estar afectado por las condiciones de acidez en el suelo en la localidad de Rancho Quemado y por el alto contenido calcio en los suelos de las otras cuatro localidades. Por el comportamiento de los resultados del K, *T. cacao* es una especie eficiente en la toma de K, puesto que por sus condiciones en el suelo en tres localidades existen alta competencia con Ca y es deficiente en dos de ellas. La media del K en las hojas en cada finca siempre fue más alta en el año 2019 que en el 2020, tanto en cacao como en musáceas (cuadros 3 y 4), quizás por no aplicarse y las plantas absorben dado que ya estaban en producción. De acuerdo a los rangos de suficiencias adaptados por [12] este cultivo no es eficiente en la toma de Ca, puesto que es deficiente en las hojas con altos contenidos en el suelo según rangos propuesto por [18].

En cuanto musáceas (*Musa AAB* y *Musa ABB*), solamente se explica para el año 2020, debido a que en el 2019 no se muestreó en dos parcelas por no cumplir las plantas la edad mínima propuesta y en las localidades La Guaria y La Palma el subgrupo plantado fue Bluggoe (ABB) conocido en Costa Rica como "Cuadrado" por lo que los niveles de suficiencia no corresponden. Lo importante de rescatar es que, en las tres fincas restantes, respecto al plátano (AAB), el Nt, el P y los micronutrientes mostraron valores óptimos y altos, el Zn fue deficiente, quizás porque es deficiente en los suelos, según los niveles propuestos por [18]. La concentración en las hojas fue $K > N$ lo que coincide con la extracción encontrada por [20], seguido por $Ca > Mg > P$ (cuadro 4).

En Laurel (*Cordia megalantha*), el orden de concentración de nutrientes en las hojas fue: $Ca > N > K > Mg > P$ (cuadro 4), lo que difiere de la mayoría de las especies que siempre presentan un orden donde la mayor concentración es N o K. A los dos y tres años de establecidos los árboles de *C. megalantha*, se hicieron mediciones en tres árboles de cada parcela, el mayor incremento en diámetro, altura y volumen se registró en los árboles de la localidad de Rancho Quemado y el menor se registró en La Guaria como se observa en el Cuadro 5, resultados que coinciden con los obtenidos por [21], quizás debido a que en esta última localidad el drenaje del agua es muy limitado. [22] menciona que una especie que tiene un buen crecimiento es aquella que registra un incremento medio anual en diámetro (IMAD) superior a 2,5 cm y en altura (IMAH) superior a 1,20 m. Este mismo autor, obtuvo un incremento medio anual en diámetro de 3,2 cm y en altura de 1,3 m en árboles de *C. megalantha* de doce años de edad en asocio con *T. cacao*, sin embargo, los árboles en este estudio son de edad mucho menor, los cuales pueden tener un crecimiento más acelerado. Por otro lado, son árboles que contienen mucho contenido de agua, por lo que el porcentaje de materia seca tiene a ser baja.

El menor IMAD en este estudio fue 2.28 cm con un promedio de 3.86 cm y en cuando a IMAH el promedio fue de 2.24 cm en el 2019; para el 2020 el menor IMAD fue de 2.60 cm y el promedio de 4.63 cm y para el IMAH el menor valor fue de 1.73 cm y el promedio de 2.39 en las cinco localidades (cuadro 5). En Costa Rica en suelos Ultisol con potreros y bajo sombra, [23] encontraron en *C. megalantha* incrementos anuales menores a los obtenidos en esta investigación en árboles de la misma edad de tres años.

Extracción de nutrimentos por la cosecha

En promedio, una hectárea de *C. megalantha* de dos años de edad, con un volumen promedio de 0,0156 m³ por árbol y una densidad de 42 árboles/ha, presenta una absorción de macronutrientes de 3,04 kg de Ca; 3,03 kg de N; 1,95 kg de K; 0,48 kg de Mg y 0,23 kg de P en macronutrientes (cuadro 6).

Por lo anterior, el orden estimado de absorción por el fuste obtenido en este estudio es Ca = N > K > Mg > P, lo que difiere en parte, con lo reportado por González, citado por [21], que indica que la relación de absorción de macronutrientes por *C. megalantha* es Ca > K > N > P > Mg, [24] encontró este último orden de extracción en los fustes de *C. alliodora* de siete años de edad asociado con café en la zona de Turrialba.

Referencias

- [1] Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. Boletín estadístico agropecuario. 29 ed. S. Mora y Y. Quirós (eds.). MAG, San José, Costa Rica, 2019. [en línea] Disponible: <http://www.mag.go.cr/biblioteca-virtual/BEA-0029.PDF>
- [2] G. Rodríguez. "Análisis del desempeño de la cadena productiva de palma aceitera, 2004-2008". SEPSA, Costa Rica, 2010. (01 octubre, 2019) [en línea] Disponible en http://www.infoagro.go.cr/Agronegocios/Documents/Cadena_Palma_publicable%2031-03-10.pdf
- [3] M. Román y J. E. Angulo. "Panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito: tendencias y desafíos para el desarrollo sostenible. INOGO", Costa Rica, 2013. (01 octubre, 2019) [en línea] Disponible: http://inogo.stanford.edu/sites/default/files/Informe%20econ%C3%B3mico%20INOGO%20Feb%202013_2.pdf
- [4] I. E. Henson. "Impactos ambientales de las plantaciones de palma de aceite en Malasia" (original en inglés). *Revista Palmas* 16 no 4, pp. 49-66. 1995. (20 setiembre, 2019) [en línea]. Disponible: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/490/490>
- [5] R. Quesada. "Los bosques de Costa Rica". Cartago, Costa Rica, ITCR, 2007. (4 octubre, 2019) [en línea]. Disponible: <http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>
- [6] Instituto Meteorológico Nacional. Promedios mensuales de datos climáticos de las estaciones meteorológicas ubicadas en los cantones de Osa y Golfito, Puntarenas, IMN, 2019. San José, Costa Rica.
- [7] Centro de Investigaciones Agronómicas. "Mapa digital de suelos de Costa Rica", 2020. (25 enero, 2021) [en línea]. Disponible: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139
- [8] F. Munévar, P. Franco, N. Arias. Guía general para el muestreo foliar y de suelos en cultivos de palma de aceite. Boletín Técnico Nº 37. 3 ed. Bogotá, Colombia, SENA-Cenipalma. 2016. 68 p.
- [9] M. Carrillo. "El muestreo foliar en cacao". Instituto Nacional Autónomo de Ciencias Agropecuarias (INIAP). Quevedo, Los Ríos, Ecuador, 2006. (19 setiembre, 2019) [en línea] Disponible: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/3881/6/iniapeetp-P-429.PDF>
- [10] A. López y J. Espinosa. "Manual de nutrición y fertilización del banano". Pococí, Costa Rica, IPNI. 1995. (25 octubre, 2019) [en línea] Disponible: [http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b-1b852579000057902e/c093707b0327c2fe05257a40005f359f/\\$FILE/N%20F%20Banano.002.002.pdf/N%20F%20Banano.pdf](http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b-1b852579000057902e/c093707b0327c2fe05257a40005f359f/$FILE/N%20F%20Banano.002.002.pdf/N%20F%20Banano.pdf)
- [11] T.H. Fairhurst and E. Mutert. "Interpretation and management of oil palm leaf analysis data". *Better Crops International* 13 no1, pp. 48-51. (en línea) (04 diciembre 2020) Disponible: https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Fairhurst/publication/237334825_Interpretation_and_Management_of_Oil_Palm_Leaf_Analysis_Data/links/54c9decd0cf2f0b56c24d3e6/Interpretation-and-Management-of-Oil-Palm-Leaf-Analysis-Data.pdf

- [12] Y.J. Puentes-Páramo, J.C. Menjivar-Flores, F. Aranzazu-Hernández. "Concentración de nutrientes en hojas, una herramienta para el diagnóstico nutricional en cacao". *Agronomía Mesoamericana* 27 no2, pp.329-336. 2016. [en línea] (19 diciembre, 2020). <http://dx.doi.org/10.15517/am.v27i2.19728>
- [13] D. Azofeifa. Efecto de la fertilización foliar con Ca, Mg, Zn y B en la severidad de la sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet), en el crecimiento y la producción del banano (*Musa* AAA, cv. Grande Naine). Tesis Lic. ITCR, San Carlos, Costa Rica, TEC. 2007.
- [14] J. Imaña y O. Encinas. "Epidometría forestal". Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasilia, Brasil. 2008. [en línea] (25 octubre, 2020) Disponible: https://www.academia.edu/39203782/EPIDOMETRIA_FORESTAL
- [15] J. Di Rienzo, F. Casanoves, M. Balzarini, L. González, M. Tablada, C. Robledo, InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- [16] E. Owen. "Fertilización de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Colombia". *Revista Palmas* 13 no2, pp. 39-64. 1992.
- [17] N. Durán. "Manejo de los suelos y fertilización en palma aceitera". In G. Meléndez, E. Molina (eds.). Memoria. Fertilidad de Suelos y Manejo de la Nutrición de los Cultivos en Costa Rica, 2001 [en línea] (1 setiembre, 2019). Disponible: <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilidad%20de%20Suelos.pdf>
- [18] J.C. Méndez y F. Bertsch. Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 1era ed. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica, 2012.
- [19] E. Owen. "Fertilización de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) con elementos secundarios en varios suelos de Colombia". *Palmas* 15 no 3, pp.25-39.1994.
- [20] P. Furcal-Beriguete y A. Barquero-Badilla. "Fertilización del plátano con nitrógeno y potasio durante el primer ciclo productivo". *Agron. Mesoam.* 25 no2, pp. 267-278. 2014. doi 10.15517/am.v25i2.15429
- [21] L. Mack. "Evaluación de los sistemas de producción de palma africana (*Elaeis guineensis*) establecidos por el proyecto LAPA en la región de Osa-Golfito", Puntarenas, Costa Rica. Tesis Lic. TEC. Cartago, Costa Rica, 2019. 79 p. [en línea] (01 agosto, 2019) Disponible: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11173/evaluacion_sistema_agroforestal_monocultivo_palma_africana.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [22] Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. Programa de cacao y agroforestería. Informe técnico. La Lima, Cortés, Honduras. 2009. [en línea] (14 enero, 2021) Disponible: <http://orton.catie.ac.cr/reprodoc/A8119e/A8119e.pdf>
- [23] J. Cordero y D.H. Boshier.(eds.). "Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Turrialba, Costa Rica, OFI-CATIE. pp. 493-496. 2003. [en línea] (23 octubre, 2019) Disponible:<http://orton.catie.ac.cr/reprodoc/a11445e/a11445e.pdf>
- [24] H. W. Fassbender, L. Alpizar, J. Heuveldop, G. Enríquez, H. Fölster. "Sistemas agroforestales de café (*Coffea arábica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica". III. Modelos de la materia orgánica y los elementos nutritivos. *Turrialba* 35 no4, pp. 403-413, 1985. [en línea] (07 marzo, 2021) Disponible: http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3991/Sistemas_agroforestales_de_cafe.pdf?sequence=1&isAllowed=y


An evaluation of Kd-Trees vs Bounding Volume Hierarchy (BVH) acceleration structures in modern CPU architectures



Evaluación de estructuras de aceleración Kd-Trees vs BVH en arquitecturas CPU modernas

Ernesto Rivera-Alvarado¹, Julio Zamora-Madrigal²

Fecha de recepción: 25 de enero, 2022
Fecha de aprobación: 16 de mayo, 2022

Rivera-Alvarado, E; Zamora-Madrigal, J. An evaluation of Kd-Trees vs Bounding Volume Hierarchy (BVH) acceleration structures in modern CPU architectures. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 86-98.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.6098>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: errivera@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2756-0572>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: jzamora95@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5135-2717>

Keywords

Ray tracing; CPU; acceleration structures; modern hardware; BVH; Kd-Trees, bounding volume hierarchy.

Abstract

Ray tracing is a rendering technique that is highly praised for its realism and image quality. Nonetheless, this is a computationally intensive task that is slow compared to other rendering techniques like rasterization. Bounding Volume Hierarchy (BVH) is a primitive subdivision acceleration mechanism that is the mainly used method for accelerating ray tracing in modern solutions. It is regarded as having better performance against other acceleration methods. Another well-known technique is Kd-Trees that uses binary space partitioning to adaptively subdivide space with planes. In this research, we made an up-to-date evaluation of both acceleration structures, using state-of-the-art BVH and Kd-Trees algorithms implemented in C, and found out that the Kd-Trees acceleration structure provided better performance in all defined scenarios on a modern x86 CPU architecture.

Palabras clave

Ray tracing; CPU; estructuras de aceleración; hardware moderno; BVH; Kd-Trees, jerarquía de volúmenes limítrofes.

Resumen

Ray-tracing es una técnica de sintetizado de imágenes que destaca por el gran realismo y calidad que puede brindar en una imagen. Sin embargo, esta técnica es computacionalmente intensiva y lenta en comparación a otras metodologías de sintetizado tal como rasterización. Las Jerarquías de Volúmenes Limítrofes (BVH por sus siglas en inglés) son un mecanismo de aceleración basado en subdivisión de primitivas cuyo principal uso es la aceleración de ray-tracing en soluciones modernas. Comúnmente es referida como una solución que provee mejor aceleración con respecto a otras técnicas. Otra técnica bien conocida son los árboles-Kd (Kd-Trees en inglés), los cuales usan particionamiento de espacio binario con división adaptativa de planos. En esta investigación realizamos una evaluación actualizada de ambas estructuras de aceleración, usando algoritmos del estado del arte de BVH y Kd-Trees implementados en el lenguaje C. Entre los hallazgos encontramos que Kd-Trees provee mejor aceleración en una arquitectura x86 moderna para los escenarios planteados.

Introduction

Ray tracing is the holy grail in computer graphics when it comes to its capacity of rendering realistic, high-quality images [1], but this is paid with rendering time, ray tracing is considered to be slow when compared against other techniques such as rasterization [1].

The way that ray tracing works is by defining a tridimensional scene that contains an origin (represented by a (x, y, z) coordinate), a projection plane, and several objects (primitives) that are part of the scene [2]. Mathematical rays are cast from the origin to each one of the pixels from a projection plane that represents the screen image that a user sees. If an intersection is detected between the ray and one or several objects from the scene, the color of the object with the closest intersection to the origin is the one that is painted for that pixel. This process repeats for all the pixels that are part of the projection plane. [2]

The algorithm for a basic ray tracer is quite simple. It is composed of a nested loop in which the external loop iterates through the vertical pixels of the projection plane, and the internal loop iterates through the horizontal pixels [9]. A ray is generated for each coordinate (composed of the horizontal pixel x and the vertical pixel y) to calculate its intersection (if any) with the nearest object from the scene, in order to print the color of that object in the screen. If no intersection is detected, a default color is assigned [2]. Figure 1 displays the pseudocode of a ray tracer.

Algorithm I.1: RAYTRACER(*Scene*)

```

for  $y \leftarrow 1$  to Scene.VerticalResolution
  do {
    for  $x \leftarrow 1$  to Scene.HorizontalResolution
      do {
         $R \leftarrow$  GETRAY( $x, y, \textit{Scene.eye}$ )
         $I \leftarrow$  GETNEARESTINTERSECTION( $R, \textit{Scene}$ )
        PAINTSCREEN( $x, y, I$ )
      }
    }
  
```

Figure 1. Ray tracer pseudocode.

It's well documented that when rendering an image using the ray tracing algorithm, most of the time is spent in computing ray/object intersection [15]. The basic ray tracing technique (without acceleration structures) has an $O(l n)$ time complexity. l represents the total number of pixels in the image, and n is the total number of objects that comprise the scene. Rendering time becomes unmanageable with scenes with a few thousand objects [2].

Several approaches have been developed to improve the ray/object intersection computation time. The two most popular techniques are *Kd-Trees* and *Bounding Volume Hierarchy* (BVH) [15].

The Bounding Volume Hierarchy acceleration structure uses a subdivision of the primitives (objects) that are part of the scene by creating a partitioned hierarchy of disjoint sets. Figure 2 shows the BVH mechanism; the objects of the scene are included in containers to create a binary tree data structure, where the primitives of the scene are in the leaves of the tree, and each intermediate node represents a container that stores the elements of the nodes beneath it [1].

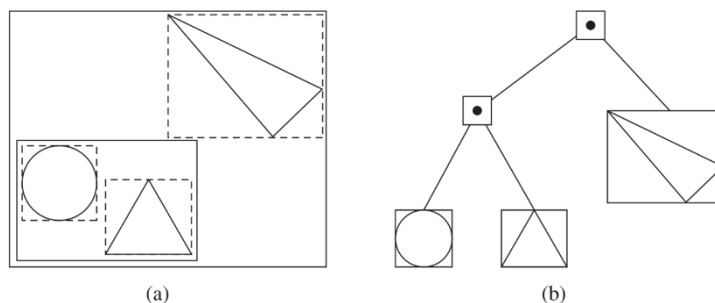


Figure 2. Bounding Volume Hierarchy diagram. Source: [15]

BVH provides rendering acceleration because when a ray is generated, its intersection is calculated for each of the nodes of the tree. If there is not an intersection with a node, all the subtree for that node can be ignored [15]. The performance gain goes from $O(l n)$ of the basic ray tracing algorithm to an average of $O(l \log n)$, which is the height of the binary tree [15].

Kd-Trees are a variation of *binary space partitioning trees* (BSP) that subdivides tridimensional space with planes. The way that a BSP works is by creating a bounding box that contains the entire scene. If the number of objects included in that box is greater than a defined threshold, the box is split by a plane. This process continues recursively until a maximum defined depth of the tree is reached, or each leaf of the resulting tree contains a sufficiently small number of objects [15]. The splitting planes can be placed in arbitrary positions inside a bounding box as long it is perpendicular to one of the coordinate axes. This property of the Kd-Trees makes their construction and traversal more efficient compared to other types of BSPs [15]. The asymptotic complexity of Kd-Trees is the same as BVH, with an average of $O(l \log n)$ [15].

Figure 3 shows the Kd-Trees mechanism; the tree is built by recursively splitting the bounding box of the scene geometry perpendicular to one of the coordinate axes. As the figure shows, the first split goes along the x axis, so the triangle will be inside the container in the right. The left region is split several more times with axis-aligned planes. [1].

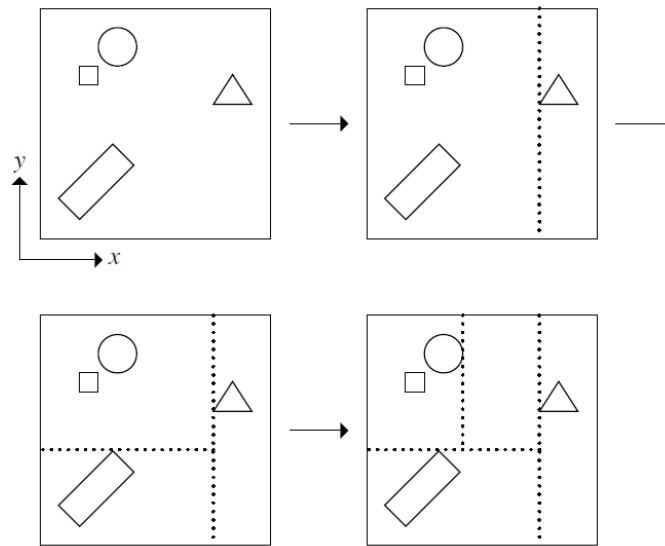


Figure 3. Kd-Trees diagram. Source: [15]

In this research, we evaluated the performance of state-of-the-art BVH and Kd-Trees acceleration structures for ray tracing in a modern CPU architecture. We implemented both methods in the C programming language and explored both algorithm's performance in different scenes that simulate real rendering scenarios. Maintaining up-to-date performance evaluation of the acceleration structures in modern x86 CPUs could lead to new findings regarding its performance. These processors have several internal improvements that could favor a specific acceleration technique. We found that contrary to popular belief, *Kd-Trees* provided better performance than BVH in the defined experiments.

Different efforts for improving the performance of the ray tracing algorithm can be found in Background section. The description of our implementation of the acceleration structures are in Design. Methodology has the hardware used, the experiments and the method of analysis of the obtained data. Results section has the obtained results which are discussed in Discussion. Finally, in the Conclusion and Future Work section we provide our final remarks of the results obtained and propose other problems that could be explored.

Background

There are several different approaches to improve the performance of the ray tracing algorithm. Some works have developed hybrid algorithms that combine ray tracing with rasterization, so for effects that require a lot of computational power, the cheaper rasterization technique is used [9]. There are commercial solutions that used this approach, like Nvidia RTX [6]. The downside is that it is not a pure ray tracing solution, and there is a compromise between image quality (photorealistic effects) and performance.

When using the GPU architecture for rendering an image with ray tracing, RAM-VRAM memory transactions are commonplace, partly due to the relatively small cache of GPU architecture. This makes memory bandwidth a bottleneck for performance [7,15]. Another initiative focused on the reduction of memory transactions to the GPU by compressing the transferred information [21]. This approach reduces the bottleneck caused by the memory bandwidth but adds time due to the compression and decompression of the data in all memory transactions.

As mentioned before, ray/object intersection is where most rendering time is spent [15]. One of the first practical acceleration structure implementation through bounding objects was developed for the CPU architecture by [11]. Since that implementation, several works have been done to improve the performance of the BVH accelerator, like the explicit caching of node-pairs to enhance the access time to the Bounding Volume Test Tree [5]. Another approach has created private workstack in to reduce memory access and inter-thread synchronization. The modifications mentioned above to the BVH algorithm creates new problems such as work-flow divergence and load-imbalance in several cases, which leads to degraded performance [3].

There is research to improve the performance of the BVH acceleration structure through tightly coupled heterogeneous computing [18]. The focus of this research was to utilize the full resources of processors that have an integrated GPU. The performance gain provided by the study was promising. Still, they don't evaluate the performance of the Kd-Trees acceleration structures and require the use of CPUs with integrated GPUs for the acceleration gain.

Another approach for accelerating ray/object intersection are binary partitioning trees (BSP trees), in which the axis-aligned BSP Trees (Kd-Trees) are the most popular for ray tracing [1]. The first reported use of using a Kd-Trees for ray tracing was by [10]. Work to improve the shortcomings of a naive implementation of the Kd-Trees have been done by [4], where it implements a space-efficient representation that avoids redundant objects from leaf nodes. This approach highly improves the performance of the traversal during ray/object intersections.

Performance comparison between BVH and Kd-Trees has been performed in several research efforts, like the one in [19]. This effort is focused only on the GPU architecture, so they don't provide insight into how both algorithms perform on the modern CPUs. Efforts like the one in [12] provides a performance evaluation of both algorithms, where Kd-Trees provided performance better in some scenarios. The main disadvantage of this research is that it was performed a long time ago when the typical CPU architecture only had one core and a very small cache memory [8].

As far as we know, there haven't recent efforts to evaluate the performance of the BVH and Kd-Trees acceleration structures in recent (2018+) mainstream CPU architectures. In this research, we provided an up-to-date comparison of the performance of both algorithms, using our own implementation of state-of-art BVH and Kd-Trees algorithms in the C programming language.

Design

In this research, we created our own ray tracer with BVH and Kd-Trees acceleration heavily based in the state of the art algorithms found in [15] and [1]. We used the C programming language as allow us to implement low-level optimizations for memory access and mathematical operations [22].

For instance, we avoided using pointers for the binary tree data structure of both acceleration methods. Instead, we flattened the tree and stored it in an array. Each element of the array is a struct that represents a node. The first child of the node will be stored in the index next to that node in the array; the second child's index is stored in the struct [15].

Figure 4 shows a pointer representation of a binary tree, while figure 5 shows a flattened representation of the same tree stored in an array, like what we used. The traversal of an array is several times faster than the traversal of the same data structure using pointers [10, 15].

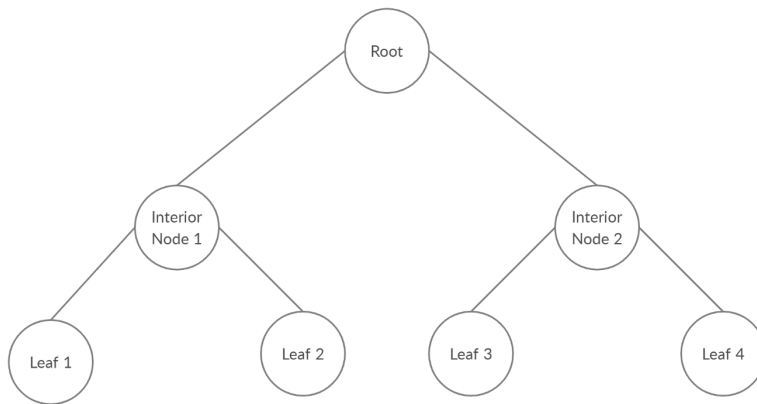


Figure 4. Pointer representation of a binary tree.

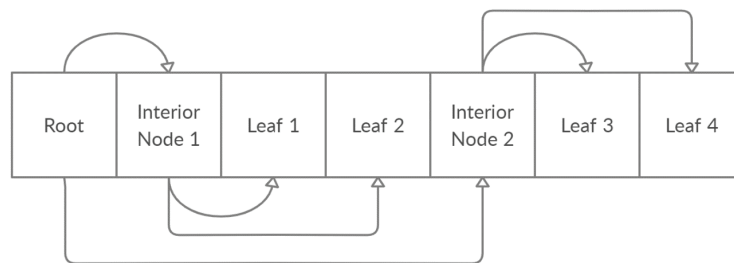


Figure 5. Flattened representation of a binary tree in an array.

To make an evaluation that contemplates real rendering scenarios, we implemented several types of primitives in the ray tracer: The included primitives are:

- Spheres.
- Cones.
- Cylinders.
- Discs.
- Triangles.

Also, we implemented transparencies, reflection, and anti-aliasing effects as they are usually present in real-world use of ray tracing for rendering [1]. We also wanted to evaluate the performance of both algorithms with the presence of both effects.

Methodology

For the evaluation, we choose to employ a Factorial Analysis of Variance (ANOVA) experiment, as it provides a mechanism for evaluating the impact that several factors under research have on a response variable [13]. Using this methodology allowed us to assess the performance of the BVH and Kd-Trees acceleration structures and the effect that other factors had in rendering time.

A factor has different levels that could impact in some way the response variable [14]. ANOVA lets us determine if the influence of a specific factor is statistically significant.

The factors and the levels used for our evaluation are the following:

Objects: The number of objects in the scene directly impacts rendering time. The following amounts were used:

- 1000.
- 4000.
- 7000.
- 10000.
- 13000.

Image resolution: The more pixels that an image contains, the more level of detail it holds. Increasing the number of pixels (resolution) in an image increase rendering time [9]. We selected three common image resolutions:

- 1280 x 720.
- 1440 x 900.
- 1920 x 1080.

Effects: We used the 2^k [13] form for evaluating the impact of the effects: anti-aliasing, reflections, and transparencies. This significantly reduced the number of experiments while allowing us to assess if influences in both algorithms' performance. Visual effects directly increase rendering time [17]. All possible combinations of the following three effects were considered:

- **AA:** Anti-aliasing.
- **RE:** Reflection (5 levels).
- **TR:** Transparency (5 levels).

Acceleration algorithm: This is the most crucial factor of our experiment; the levels are:

- Kd-Trees.
- BVH.

There are $5 \times 3 \times 8 \times 2 = 240$ combinations, as we decided to do 15 replications to increase the validity of the results, we ended up with $240 \times 15 = 3600$ runs of the experiment. We automated the execution and recollection of data through scripts.

The equipment used to run the experiments is described in table 1.

Table 1. Hardware description.

Characteristic	Specification
Vendor	AMD
CPU Model	Ryzen 2600
Price(\$)	199
CPU Cores/Threads	6/12
Power Consumption(W)	65
CPU Cache L2/L3(MB)	3/16
CPU Frequency(GHz)	3.4-3.9
RAM (GB)	8
RAM Frequency (MHz)	2400
RAM Configuration	Single Channel
Storage Type	SSD
Storage Size (GB)	256

The scenes used for the experiments contained different objects randomly distributed through the x , y , z axis. We limited the random range to guarantee that all the objects were held inside the projection frame. We also randomized the sizes, shapes, and colors of the objects contained in the scene. In this way, we created a good representation of a ray-traced scene [15]. The factors of resolution, effects, and acceleration algorithm were adjusted to fit a specific combination of the experiment.

The response variable of the experiments is rendering time, as it represents performance [14].

Our research differs from [17], as they used an Accelerated Processing Unit (APU) to increase the performance of computationally expensive workloads. It also differs from [16] as they make a performance evaluation of the classic and BVH accelerated ray tracing algorithm using all the computing resources available in commodity hardware solutions.

Results

To comply with ANOVA adequacy requirements, we applied a square root transformation of the response variable [13]. Nonetheless, we present results de-transformed.

The results of the ANOVA analysis produced by R [20] for this experiment are shown in table 2.

Table 2. Anova table.

Characteristic	Sum Sq	Df	F value	Pr (>F)
Algorithm	99706	1	41426901.1	2.2e-16
Objects	376757	4	39134663.2	2.2e-16
Resolution	78398	2	12286865.3	2.2e-16
Effects	1211889	7	71932539.9	2.2e-16
Algorithm:Objects	5744	4	596614.8	2.2e-16
Algorithm:Resolution	6048	2	1256371.1	2.2e-16
Algorithm:Effects	226974	7	3993662.3	2.2e-16

Average rendering time in function of the acceleration algorithm is presented in figures 6, 7, 8 and 9 presents the average rendering time per effects, objects and resolution factors in function of the acceleration algorithm.

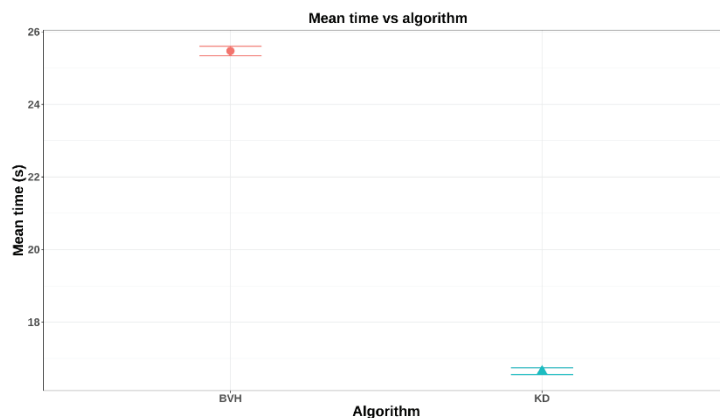


Figure 6. Average rendering time in function of the acceleration algorithm.

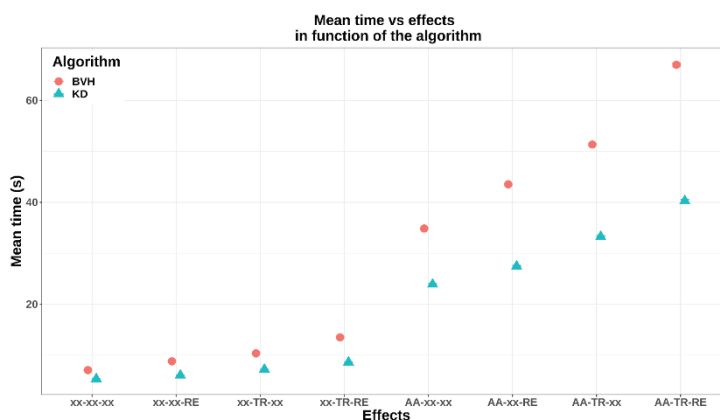


Figure 7. Average rendering time per effects in function of the acceleration algorithm.

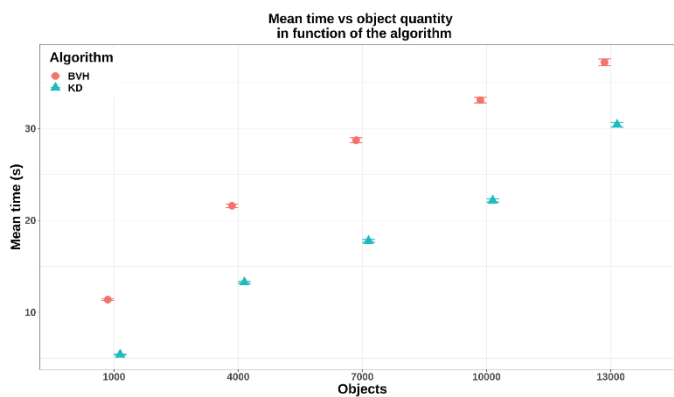


Figure 8. Average rendering time per object quantity in function of the acceleration algorithm.

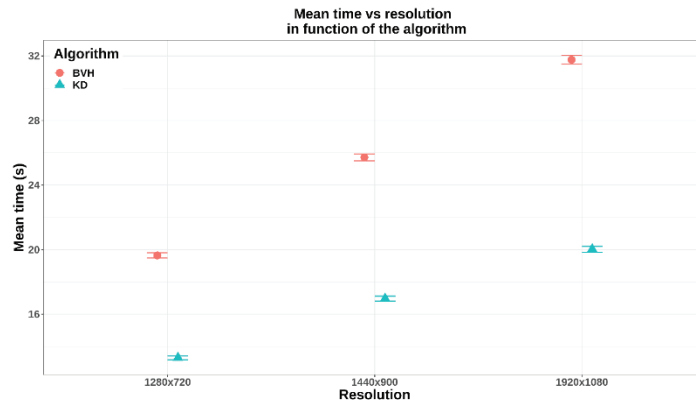


Figure 9. Average rendering time per resolution in function of the acceleration algorithm.

The average rendering time of each acceleration algorithm is displayed in table 3. This time includes and summarizes all combinations of effects, resolution, and object quantities.

Table 3. Obtained metrics.

Characteristic	Specification
Algorithm	Average Time (s)
BVH	25.47
Kd-Trees	16.65

Two sample images generating through the experiments are found in figures 10 and 11. Both images were rendered at the maximum resolution with all the effects.

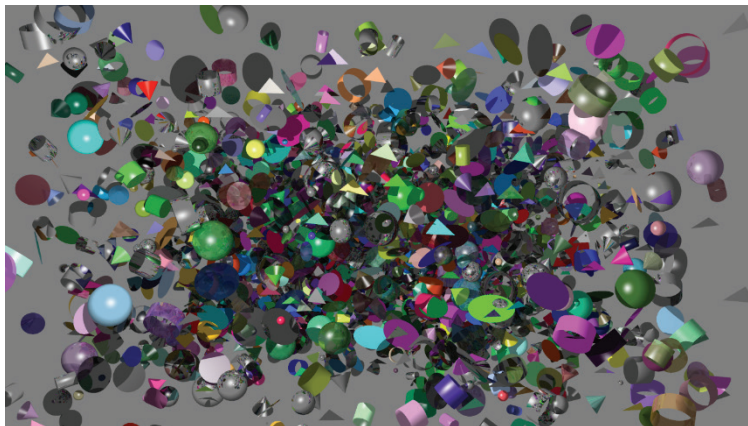


Figure 10. Scene with 7000 randomly distributed objects.

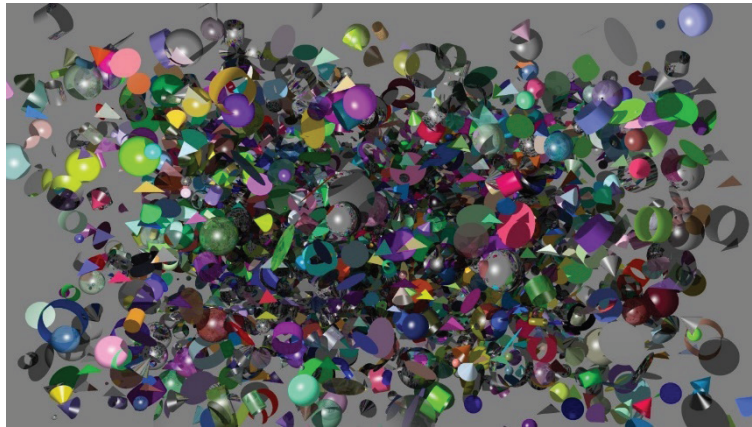


Figure 11. Scene with 10000 randomly distributed objects.

Discussion

Table 2 shows that the factors defined for this research and its interactions are statistically different (as the low obtained p values demonstrates). With this information, we can conclude from the average rendering times that we obtained during the experiment.

The average rendering time per algorithm is summarized in Figure 6. The figure shows that for the defined experiment, Kd-Trees performs significantly better than BVH.

We proceeded to decompose the rendering time per each one of the factors defined for the experiment as it is shown in figures 7, 8 and 9. In all cases we found the same result, Kd-Trees has better performance than BVH.

For the case of effects in function of the acceleration algorithm, in figure 7, we see a tendency that as more effects are included in the image, the rendering time difference between BVH and Kd-Trees becomes larger. When an effect like anti-aliasing is included in a scene, it generates more rays and thus more mathematical operations and memory accesses during rendering [1]. More rays and memory accesses mean more traversals of the BVH and Kd-Trees binary trees. As we see from the results, Kd-Trees perform better when these two factors are increased.

For the case of object quantity in function of the acceleration algorithm, we found out that in all instances, Kd-Trees perform better. Still, we don't see any tendency as object quantity increases. Object quantity is directly related to the size of the BVH and Kd-Trees trees, and thus is directly related to memory accesses [15]. As our results showed, it seems that KD-Trees performs better than BVH when memory accesses are increased.

Increasing the resolution of an image, adds more mathematical operations and memory accesses, as is displayed in figure 9. Again, Kd-Trees performed better than BVH for all resolutions. We observed that as the number of pixels increased, the advantage of the Kd-Trees accelerator over BVH became larger.

Modern x86 CPUs are more efficient as they have a better internal design. For instance, modern CPUs have fewer pipeline stalls, more cache memory, better memory access mechanisms, and improved branch prediction than older processors [8]. All these improvements could favor Kd-Trees in modern architecture. As we saw, for all defined scenarios, Kd-Trees performed better than BVH. Nonetheless, this is not the preferred acceleration technique in modern renderers [1,15].

Trade-offs between BVH and Kd-Trees are well documented [15]; for instance, BVH is more efficient building the tree than Kd-Trees, and Kd-Trees deliver slightly faster ray intersection tests. From our experiment, we can observe in table 3 the average rendering time of both algorithms, in which kD-Trees is 34% faster than BVH. In this case, Kd-Trees is considerably faster, not slightly.

Conclusions and Future Work

We explored the performance of the BVH and Kd-Trees algorithm in a modern x86 CPU. Our tests showed favorable results for the Kd-Trees acceleration structure in all tests. Our ray tracer included anti-aliasing, reflections, transparencies, different primitives and resolutions.

This research provided an up-to-date comparison of both algorithms in a modern processor. We implemented the ray tracer using the C programming language and did our implementations of both algorithms as fair as possible. Legacy x86 architectures are quite different from modern x86 processors as they have more cache memory, better memory access systems, reduced pipeline stalls, and improve prediction mechanisms [8]. These factors could favor the KD-Trees ray/object intersection mechanism.

For future work we would like to explore more deeply the reason of the advantage of Kd-Trees over BVH, in this case we would like to explore memory access patterns, processor affinity and cache misses in both modern and legacy (at least 15 years older) x86 processors. Also, we would like to perform the tests in different programming languages, as different previous evaluations were performed in GPUs with CUDA [19], others were performed in C++ with legacy processors [7], so we would like to discard programming language as a driving factor for the performance differences. Finally, we would like to verify if the advantage of KD-Trees vs BVH remains in different CPU architectures like ARM, RISC-V and MIPS.

References

- [1] T. Akenine-Möller, E. Haines, and N. Hoffman, *Real-Time Rendering*, Fourth Edition. A K Peters/CRC Press, 2018.
- [2] J. Buck, *The Ray Tracer Challenge: A Test-Driven Guide to Your First 3D Renderer* (Pragmatic Bookshelf). Pragmatic Bookshelf, 2019.
- [3] Chitalu, Floyd M. and Dubach, Christophe and Komura, Taku, "Bulk-synchronous Parallel Simultaneous BVH Traversal for Collision Detection on GPUs," in *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, ser. I3D '18. New York, NY, USA: ACM, 2018, pp. 4:1–4:9.
- [4] B. Choi, B. Chang, and I. Ihm, "Improving memory space efficiency of kd-tree for real-time ray tracing," *Computer Graphics Forum*, vol. 32, 10 2013.
- [5] P. Du, E. S. Liu, and T. Suzumura, "Parallel Continuous Collision Detection for High-performance GPU Cluster," in *Proceedings of the 21st ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, ser. I3D '17. New York, NY, USA: ACM, 2017, pp. 4:1–4:7.
- [6] E. Haines and T. Akenine-Möller, *Ray Tracing Gems: High-Quality and Real-Time Rendering with DXR and Other APIs*. Apress, 2019.
- [7] V. Havran, "Heuristic Ray Shooting Algorithms," Ph.D. dissertation, Czech Technical University, 166 36 Prague 6, Czechia, 2000.
- [8] J. Hennessy, *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann Publishers, an imprint of Elsevier, 2018.
- [9] J. F. Hughes, A. van Dam, M. McGuire, D. F. Sklar, J. D. Foley, S. K. Feiner, and K. Akeley, *Computer Graphics: Principles and Practice* (3rd Edition), 3rd ed. Pearson India, 2019.
- [10] M. R. Kaplan, "The use of spatial coherence in ray tracing," 1987.

- [11] T. L. Kay and J. T. Kajiya, "Ray tracing complex scenes," in Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ser. SIGGRAPH '86. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1986, p. 269–278.
- [12] J. P. Molina Masso and P. González, "Automatic hybrid hierarchy creation: a cost-model based approach," Computer Graphics Forum, vol. 22, pp. 5–13, 03 2003.
- [13] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments. Tenth Edition. Wiley, 2020.
- [14] D. Patterson, Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface. Sixth Edition. Morgan Kaufmann, 2020.
- [15] M. Pharr, W. Jakob, and G. Humphreys, Physically Based Rendering: From Theory to Implementation, 4th ed. Early Release, Morgan Kaufmann, 11 2022.
- [16] E. Rivera-Alvarado and F. J. Torres-Rojas, "Ray tracing acceleration through heterogeneous integrated commodity hardware," in 2019 38th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC), 2019, pp. 1–8.
- [17] E. Rivera-Alvarado and F. J. Torres-Rojas, "Apu performance evaluation for accelerating computationally expensive workloads," Electronic Notes in Theoretical Computer Science, vol. 349, pp. 103 – 118, 2020, proceedings of CLEI 19, the XLV Latin American Computing Conference.
- [18] E. Rivera-Alvarado and F. J. Torres-Rojas, "Bounding volume hierarchy acceleration through tightly coupled heterogeneous computing," in High Performance Computing, J.L. Crespo-Mariño and E. Meneses-Rojas, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 94–108.
- [19] M. Vinkler, V. Havran, and J. Bittner, "Bounding volume hierarchies versus kd-trees on contemporary many-core architectures," in Proceedings of the 30th Spring Conference on Computer Graphics, ser. SCCG '14. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2014, p. 29–36.
- [20] H. Wickham and G. Grolemund, R for Data Science: Import, Tidy, Transform, Visualize, and Model Data. O'Reilly Media, 2017.
- [21] H. Ylitie, T. Karras, and S. Laine, "Efficient Incoherent Ray Traversal on GPUs Through Compressed Wide BVHs," in Proceedings of High Performance Graphics ser. HPG '17. New York, NY, USA: ACM, 2017, pp. 4:1–4:13.
- [22] Seacord, Robert, Effective Cs: an introduction to professional C programming, No Starch Press, Inc, 2020.

Mechanical properties of polycaprolactone microfilaments for muscular tissue engineering

Propiedades mecánicas de microfilamentos de policaprolactona para ser usados en ingeniería de tejidos

Laura Rojas-Rojas¹, Teodolito Guillén-Girón²

Fecha de recepción: 9 de marzo, 2022
Fecha de aprobación: 28 de junio, 2022

Rojas-Rojas, L; Guillén-Girón, T. Mechanical properties of polycaprolactone microfilaments for muscular tissue engineering. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 99-108.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.6154>

- 1 Material Science and Engineering School, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: laurarojas@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1096-7659>
- 2 Material Science and Engineering School, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: tguillen@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1823-3403>

Keywords

Mechanical properties; biomimetic fibers, elasticity, tissue engineering applications.

Abstract

Polymeric scaffolds can be fabricated as microfilaments to replicate the mechanical characteristics and biological configuration of skeletal muscles and tendons. The microfilaments used in this research were fabricated from polycaprolactone (PCL) pellets by extrusion and a spooling system without using solvents. Their mechanical properties were investigated by applying monotonic and dynamic loads on aligned grouped microfilaments using a customized grip adapter. The fabrication method was simple and produced a homogeneous microfilament with a $90 \pm 3 \mu\text{m}$ diameter. The monotonic tests showed the elasticity of the microfilaments was $E = 1863 \pm 590 \text{ MPa}$, and their yield strength was $\sigma_y = 242 \pm 45 \text{ MPa}$. The dynamic load test results showed that PCL microfilaments resisted periodic loads for 5.3×10^5 cycles, retaining a maximum deformation of 55%. The fabricated microfilament has the potential to be used as a biomimetic polymeric scaffold suitable for mechanical stimulation because of its outstanding mechanical behavior during dynamic loading conditions.

Palabras clave

Propiedades mecánicas; andamio biomimético; elasticidad; ingeniería de tejidos.

Resumen

Es posible replicar la configuración biológica y mecánica de los músculos esqueléticos fabricando andamios poliméricos en forma de microfilamentos. En esta investigación se fabricaron microfilamentos utilizando gránulos de policaprolactona (PCL) mediante el proceso de extrusión y un sistema de arrastre sin utilizar disolventes en la fabricación. Se investigaron las propiedades mecánicas de los microfilamentos mediante la aplicación de cargas monotónicas y dinámicas. Las cargas se aplicaron utilizando un adaptador de agarre personalizado que mantenía los microfilamentos agrupados y paralelos entre sí. Entre los resultados se encontró que el método de fabricación utilizado fue adecuado para producir un microfilamento homogéneo de $90 \pm 3 \mu\text{m}$ de diámetro. Además, los ensayos monotónicos mostraron que el grupo de microfilamentos tenían una elasticidad de $E = 1863 \pm 590 \text{ MPa}$, y un límite de fluencia de $\sigma_y = 242 \pm 45 \text{ MPa}$. Los resultados dinámicos mostraron que los microfilamentos de PCL resistieron cargas periódicas durante 5.3×10^5 ciclos, reteniendo 55% de deformación en este número de ciclos. El microfilamento fabricado tiene el potencial de ser utilizado como un andamio polimérico biomimético adecuado para la estimulación mecánica debido a su excelente comportamiento mecánico durante la carga dinámica.

Introduction

Tissue engineering, with applications in disease modelling and biomedical areas, remains the focus of scientific research [1], [2]. Various scaffolds have been fabricated for these applications and have been studied from biological and mechanical perspectives [3]. One of the most common base materials for tissue engineering is polycaprolactone (PCL) [4]–[6]. Various PCL structures and configurations have been fabricated as scaffolds and used in vitro and in vivo for tendon, ligament, and skeletal muscle applications [4], [5], [7]. These studies take advantage of the polymer's biocompatibility and its elastic properties [4].

The most common fabrication techniques for PCL scaffolds include variations of additive manufacturing and electrospinning [5], [8]–[10]. PCL scaffolds can be designed with different architectures and can be 3D printed in various configurations such as mats, meshes or porous structures [11]–[14]. Baji et al [7] reviewed several experiments that focused on the fabrication of PCL filaments by electrospinning, ranging from 0.1 μm to 1.4 μm in diameter, and Ghobeira et al. [15] reported PCL scaffolds fabricated by a modified fused deposition modeling (FDM) method with random or aligned fiber configurations. Li et al [16] provided a review of the mechanics of single electrospun fibers, and Shanmugam et al. present a review for 3D printed fiber composites. Electrospinning is mainly used for neural, ocular and bone tissue engineering [17]. Other fabrication techniques rely on the thermoplastic properties of PCL, such as extrusion and melting-drawing techniques. These techniques are used to produce individual polymeric fibers. An et al [18] used a drawing technique to fabricate a bundle of PCL fibers that ranged from 10 μm to 25 μm in diameter and Visco et al. [19] fabricated PCL suture threads by extrusion with a resulting average diameter of 300 μm .

Skeletal muscular tissue, in nature, always reacts to force as an aggregate of fibers; therefore, its mechanical properties are a result of grouped fibers and they cannot be inferred from an individual muscular fiber [3], [20]. When engineering a scaffold for skeletal muscle tissue engineering applications, it must mimic the skeletal-muscle physiology and its mechanical properties. The scaffold should aim to imitate the collective behavior of a muscle and have elastic properties. Moreover, *in vitro* cell growth occurs over time; therefore, the behavior of a scaffold under several hours of varying stress must be considered. Several authors such as Alexeev et al [4]; Baji et al. [7]; Brennan et al. [21]; and Kim et al [22] have described the monotonic mechanical properties of electrospun fibers; however, the cyclic properties of the fibers need to be studied further. Among the most common techniques for mechanical testing of microfilament samples is the use of grips that apply pressure on both ends of a specimen [23], cleat jigs or similar devices [24], [25], and using support material with an adhesive to fix the filament and attach the support to a measurement apparatus [26].

This work aims to investigate the monotonic and dynamic mechanical properties of a muscular tissue engineered scaffold fabricated with PCL using a grip system suited for this purpose. Extrusion was used to produce homogeneous PCL microfilaments to be used as samples. The filament was organized into bundles that mimic skeletal muscle using a tailor-made grip system. Monotonic tensile tests and stress-control cyclic tests were conducted on the fabricated PCL microfilaments to investigate the strain under different load controlled conditions. The results were used to understand and improve the fabrication, number, and behavior of polycaprolactone microfilaments to be used as bundles to model skeletal muscle. Various tests were conducted, and the mechanical properties of the microfilament bundles were estimated. The obtained information was used to understand, improve, and predict the behavior of PCL filaments to be used as a skeletal muscle model scaffold.

Materials and methods

Microfilament fabrication and surface characterization

Polycaprolactone, PCL (Sigma-Aldrich, Mn 80000 g/mol) pellets were used to fabricate PCL microfilaments. A spool of filament was fabricated using an extruder (Filabot Ex2) at 80 °C with a 1 mm diameter die (see Figure 1 (a)) and collected with a spooler, (see Figure 1 (b)). Then, the filament was stretched until plastic yield, $\epsilon \sim 97\%$. Five samples were chosen for monotonic tensile testing and six samples were selected for dynamic tensile testing.

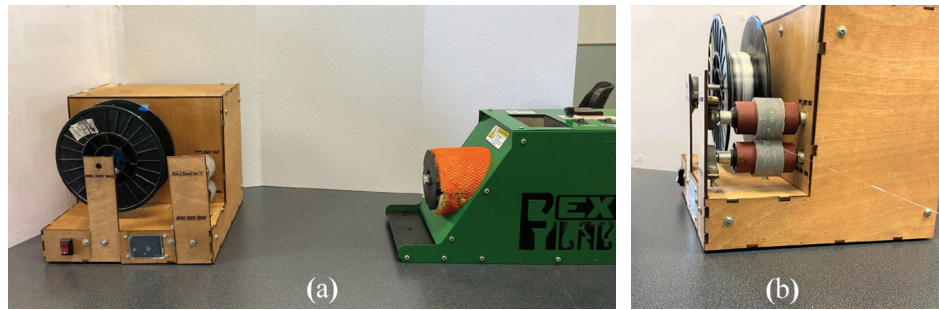


Figure 1. Fabrication technique of PCL filaments (a) Extruder and spool system (b) Spooler with filament.

Mechanical testing

Monotonic tensile test

The mechanical properties of the microfilaments were evaluated with a testing and alignment adapter (figure 2) fabricated from 316 L stainless steel and designed to be attached to a load cell. Figure 2 (a) depicts the adapter components and figure 2 (b) shows the microfilament bundle held in the adapter. The assembly of the microfilaments on the testing adapter began by fixing them between the metal retainers; then, two turns were made around the first knob. Next, the microfilaments were carefully tied around both knobs, without adding extra tension. Then, the remaining end was tied twice onto the second knob and finally fixed between the second set of metal retainers.

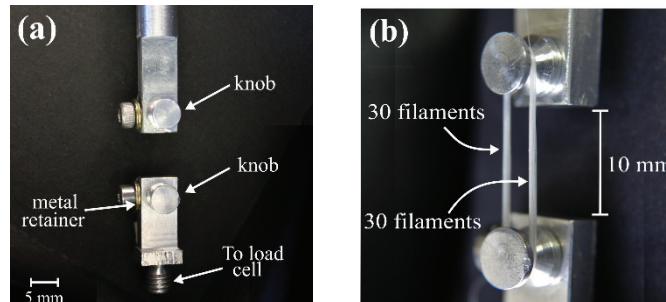


Figure 2. Tailor made grip adapter for mechanical testing of PCL microfilaments
(a) Grip adapter with labels (b) Microfilaments tied to grip adapter.

The testing adapter was placed on a servohydraulic test system (model 810, MTS System Corp) equipped with a 250 N load cell. Monotonic tensile tests were performed on five samples. The cross-head speed was set to 38 mm/min following the rate for suture materials according to the United States Pharmacopeia (USP) standards for tensile strength [27], and the test was carried out until rupture of at least one microfilament. The stress was calculated as the load divided by the equivalent area. The equivalent area corresponds to the sum of the cross-sectional area of the 60 individual filaments using the average diameter. The strain (ϵ) was the ratio between the height change ($\Delta l = l_f - l_0$) and the initial height ($l_0 = 19$ mm) between the knob's centers.

The mechanical parameters of Young's modulus (E), yield stress (σ_y), and ultimate yield stress (σ_{ult}) were calculated. E was obtained as the slope of the linear section of the stress-strain curve, σ_y was obtained as the offset of 0.2% of the strain, and σ_{ult} was calculated as the maximum value just before one of the filaments broke.

Dynamic tensile test

The PCL microfilament bundles were studied under a dynamic loading scheme. A test was designed to probe the deformation of the sample for 5.3×10^5 cycles (~ 72 h). Cyclic tests were performed under load control with a sinusoidal signal at 2 Hz. The amplitude was selected from the elastic region of the microfilament behavior determined by the monotonic tensile test, and the maximum and minimum stress were calculated as stated previously. The selected amplitude corresponded to $\sigma_{\min} = 52$ MPa for all tests and σ_{\max} was set to σ_y , $0.9\sigma_y$, $0.8\sigma_y$, $0.7\sigma_y$, or $0.6\sigma_y$ in each test. For each dynamic test, hysteresis loops were obtained, and several secant moduli (E_{sec}) were calculated as the slope of the peak and valley values at selected cycles (see Table 1). Several cycles were selected to determine the progress of deformation throughout the test.

Table 1. E_{sec} values and their corresponding cycle.

Esec(i)	Cycle
Esec1	10
Esec2	1500
Esec3	8100
Esec4	57100
Esec5	81500
Esec6	439300

Results and discussion

Microfilament fabrication and surface characterization

Figure 3a shows an individual, unfused fabricated microfilament, whose surface is mostly uniform and shows no fabrication defects. The microfilament can be arranged as parallel fibers or in woven configurations to produce different scaffolds for tissue engineering applications. This fabrication technique was versatile because different diameters can be fabricated by customizing the extruder's die and spool speed.

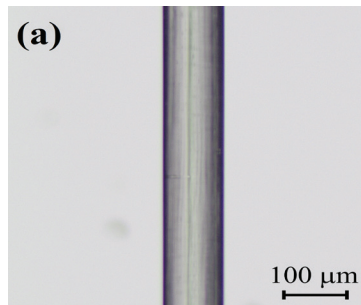


Figure 3. Light micrography of a fabricated PCL microfilament at (100X)

An important advantage of the fabrication method implemented in this work is that no solvents were required, resulting in the chemical and superficial properties of the filaments remaining unchanged. This is important because the microfilaments maintain the biocompatibility and biodegradability of PCL [28]. Kim et al and An et al have also fabricated PCL microfilaments without using any solvents with diameters that range from 9 to 25 μm . In contrast, other techniques require solvents that can be prejudicial for in-vitro applications. Solvent-based techniques can also be used to produce random fiber networks [5], [6].

Mechanical characterization of the microfilament's bundles

Monotonic tensile test

A stress-strain curve of the microfilaments is shown in figure 5. The curve begins with a small toe followed by a linear elastic region. The change in slope is associated with plastic deformation of the microfilaments. After plastic deformation of approximately 22%, failure occurs by the rupture of one or more microfilaments; this is evident as a series of steep decreases in the stress values. Each curve represents the calculated stress for a group of 61 filaments placed in the grip system. Its mechanical parameters were calculated: the Young's modulus was $E = 2184 \pm 394$ MPa, the tensile yield stress was $\sigma_y = 275 \pm 31$ MPa, and the tensile maximum stress was $\sigma_{ult} = 316 \pm 59$ MPa. The measured elasticity of the microfilament group produced in this work is in the range of the elastic modulus of an animal tendon of ~ 2000 MPa [29]. Other authors have fabricated PCL microfilaments with diameters of ~ 300 μm [19] and 6 μm [4], however, their monotonical mechanical properties were measured for individual threads or filaments; therefore, they cannot be compared directly with the microfilament bundles presented here, owing to differences in the measuring method and grip system. The tied configuration was selected because it results in a 3D structure that resembles the organization of a skeletal muscle.

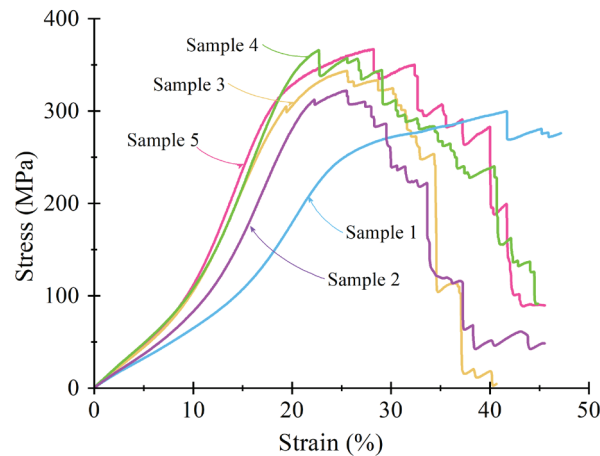


Figure 5. Tensile stress-strain behavior for 5 bundles of PCL.

The elastic modulus of the microfilaments depends on their size, orientation, and distribution. The developed grip adapters were an important tool for mechanically testing the collective behavior of the microfilaments as independent, parallel, organized filaments with an adjustable initial gauge length. By adjusting the number of filaments or by modifying their diameter, the mechanical properties of the scaffold can be tuned. The grip adapter presents a reproducible and adequate technique that properly holds the sample and allows the mechanical properties of 3D scaffolds to be studied; also, it is a versatile design because tests can be conducted under tensile loads, torsional loads, or a combination of these. Additionally, several diameters of polymeric filaments, ranging from 10 μm to 2 mm, can be fixed using the adapter.

Dynamic tensile test

The dynamic response of microfilament bundles was studied under different loading conditions to determine the load range where filaments can be used for long term studies. Therefore, it was important to determine the mechanical conditions for which the filaments can be dynamically stressed. Figure 6(a) shows the mean strain σ_{mean} for PCL groups as a function of the cycle number (N), where each curve represents a different loading amplitude. The mean strain was

calculated as $\sigma_{mean} = |\sigma_{max} + \sigma_{min}| 2^{-1}$. For $\sigma_{mean} < \sigma_y$, at the beginning of the test, $N < 70$ cycles, the microfilaments deformed quickly. Next, the strain increased around 2% during 10,000 cycles, and finally, when 100,000 cycles were reached, the filaments reached a steady state where strain remained roughly constant; for example, strain increased by only 1% from 100,000 to 530,000 cycles. Tissue engineering scaffolds with mechanical stimulation, such as bundled microfilaments, are required to retain their integrity for the duration of cellular reproduction and proliferation [22], [30]. The results show that PCL microfilaments can be used under constant loading tests for at least 5.3×10^5 cycles, equivalent to 3 days. Therefore, the microfilament bundles are suitable for dynamic stimulation of cell-seeded microfilaments, as long as a controlled environment is provided. Figure 6(a) shows that filaments can be tested under a wide variety of loading schemes without losing their integrity, for dynamic loads less than its yield stress $\sigma_{mean} < \sigma_y$. The fabricated microfilaments can be studied under constant dynamic loading conditions or designed loading conditions that are either static or periodic under stress-controlled tests with a σ_{mean} value of 270 MPa.

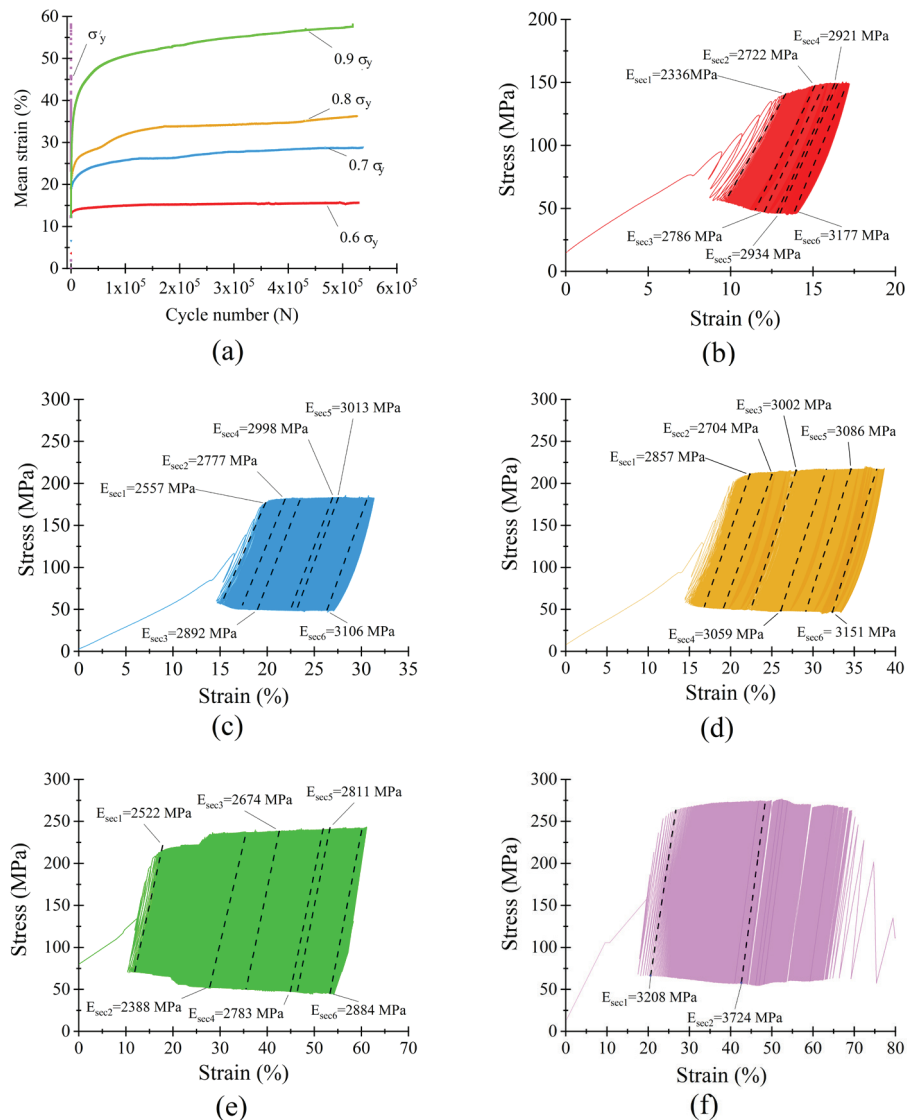


Figure 6 Dynamic response of microfilament groups under various loading scenarios (a) σ_{mean} as a function of N (b) $\sigma_{max} = 0.6\sigma_y$ (c) $\sigma_{max} = 0.7\sigma_y$ (d) $\sigma_{max} = 0.8\sigma_y$ (e) $\sigma_{max} = 0.9\sigma_y$ (f) $\sigma_{max} = \sigma_y$

The strain of the samples is directly related to the applied stress, as seen in figure 6(a). The highest strain reached was for $0.9 \sigma_y$ and the lowest was for $0.6 \sigma_y$, as shown in table 2. For example, for $\sigma_{max} = 0.6 \sigma_y$, the highest strain was 15% and a steady state was reached in less than 1.25×10^4 cycles. The difference between the end and the beginning of the steady state was less than 1%. When $\sigma_{max} = \sigma_y$, samples lasted only 6,000 cycles.

The microfilaments exhibited permanent plastic deformation at the end of the test. Figures 6 (b)–(f) show the hysteresis curve for the microfilaments for all σ_{max} values. For $\sigma_{max} < 0.9 \sigma_y$ no cyclic softening or hardening of the microfilaments was present; this was evident because the amplitude remained between σ_{min} and σ_{max} . For $\sigma_{max} = 0.9 \sigma_y$, a small cyclic hardening occurred when $\epsilon = 20\%$ until the end of the test. For $\sigma_{max} = \sigma_y$, there was a slight cyclic softening when $\epsilon = 47\%$. All PCL microfilament groups exhibited cyclic deformation accumulation; this was visible as the hysteresis curves shifted along the strain axis. The deformation accumulation was directly related to the applied strain, being the highest for $\sigma_{max} = 0.9 \sigma_y$.

Table 2. Maximum strain, steady state and plateau deformation for the loading conditions.

	Maximum strain (%)	Steady state Cycles	Plateau deformation from 100,000 to 530,000 cycles (%)
$\sigma_{max} = 0.6 \sigma_y$	15	$< 1.25 \times 10^4$	1
$\sigma_{max} = 0.7 \sigma_y$	26	5×10^4	4
$\sigma_{max} = 0.8 \sigma_y$	35	1.5×10^5	4
$\sigma_{max} = 0.9 \sigma_y$	55	1.5×10^5	7

The secant moduli, for each stress-strain curve, are shown in table 3. Statistically, E_{sec1} to E_{sec6} had a normal distribution and equal variance ($\alpha = 0.05$; $p = 0.7$). The percentage difference $E_{sec\%}$ was calculated as $E_{sec\%} = ((E_{sec6} - E_{sec1}) \cdot (E_{sec1})^{-1}) \cdot 100$ to monitor the stiffness evolution from the beginning to the end of the test. From $\sigma_{max} = 0.6 \sigma_y$ to $\sigma_{max} = 0.9 \sigma_y$, $E_{sec\%}$ was less than 2% of $E_{sec(i)}$; therefore, differences were small, suggesting that for each σ_{max} , the stiffness of the microfilaments was relatively constant during the 5.3×10^5 cycles. The low amount of change in deformation, reflected by the small change in the secant modulus, indicates that the PCL microfilaments hold their mechanical elasticity and properties for at least 5.3×10^5 cycles. These characteristics indicated that the microfilaments were suitable for *in vitro* mechanical stimulation tests with different loading schemes. For instance, cell-loaded microfilaments can be subjected to different stress scenarios to study the resulting growth and proliferation of cells depending on the applied stress[31], [32].

Table 3. Calculated secant moduli of PCL microfilament samples at different times during fatigue testing.

	Esec1	Esec2	Esec3	Esec4	Esec5	Esec6	Esec%
$\sigma_{max} = 0.6 \sigma_y$	2336	2722	2786	2921	2934	3177	36
$\sigma_{max} = 0.7 \sigma_y$	2557	2777	2892	2998	3013	3106	21
$\sigma_{max} = 0.8 \sigma_y$	2857	2704	3002	3059	3086	3151	10
$\sigma_{max} = 0.9 \sigma_y$	2522	2388	2674	2783	2811	2884	14
$\sigma_{max} = \sigma_y$	3208	3724	Sample failed				

Conclusions

This study represents an initial phase towards achieving an *in vitro*, biomimetic, polymeric scaffold suitable for mechanical stimulation in a bioreactor. A simple technique was used to fabricate PCL microfilaments 90 μm in diameter that were uniform and had a smooth surface. Due to the fabrication technique the microfilament kept its chemical and superficial properties. A grip system was designed and tested to organize the microfilaments as bundles for mechanical testing. The evaluation of the static mechanical properties revealed an elasticity of 2184 MPa, similar to that of muscular tissue, and dynamic testing showed that the microfilaments endured stress-controlled fatigue for 5.3×10^5 cycles, while the stiffness of the filaments remained similar for the duration of the test. The fabricated microfilaments show promising mechanical properties for use as parallel aligned scaffolds for an *in vitro* mechanical stimulation assay in which several stress values could be adjusted for the required application. Moreover, the number of filaments in a bundle can be controlled depending on the application. The results of this study suggest that the PCL microfilaments may be promising for cell-growth and proliferation studies under mechanical loading scenarios.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Tecnológico de Costa Rica (TEC) for funding this research. We wish to acknowledge the kind assistance of Esteban Rodríguez.

Data availability

The raw data required to reproduce these findings is available upon request to the corresponding author.

References

- [1] Alexeev, D., Goedecke, N., Snedeker, J., & Ferguson, S. (2020). Mechanical evaluation of electrospun poly(ϵ -caprolactone) single fibers. *Mater. Today Commun.*, 24(April), 101211. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101211>
- [2] An, J., Chua, C. K., Leong, K. F., Chen, C. H., & Chen, J. P. (2012). Solvent-free fabrication of three dimensionally aligned polycaprolactone microfibers for engineering of anisotropic tissues. *Biomed. Microdevices*, 14(5), 863–872. <https://doi.org/10.1007/s10544-012-9666-3>
- [3] Baji, A., Mai, Y. W., Wong, S. C., Abtahi, M., & Chen, P. (2010). Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. *Compos. Sci. Technol.*, 70(5), 703–718. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.01.010>
- [4] Brennan, D. A., Conte, A. A., Kanski, G., Turkula, S., Hu, X., Kleiner, M. T., & Beachley, V. (2018). Mechanical Considerations for Electrospun Nanofibers in Tendon and Ligament Repair. *Adv. Healthcare Mater.*, 7(12), 1–31. <https://doi.org/10.1002/adhm.201701277>
- [5] Capel, A. J., Rimington, R. P., Fleming, J. W., Player, D. J., Baker, L. A., Turner, M. C., ... Lewis, M. P. (2019). Scalable 3D printed molds for human tissue engineered skeletal muscle. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 7(Feb), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00020>
- [6] Cipitria, A., Skelton, A., Dargaville, T. R., Dalton, P. D., & Hutmacher, D. W. (2011). Design, fabrication and characterization of PCL electrospun scaffolds - A review. *J. Mater. Chem.*, 21(26), 9419–9453. <https://doi.org/10.1039/c0jm04502k>
- [7] Croisier, F., Duwez, A. S., Jérôme, C., Léonard, A. F., Van Der Werf, K. O., Dijkstra, P. J., & Bennink, M. L. (2012). Mechanical testing of electrospun PCL fibers. *Acta Biomater.*, 8(1), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.08.015>
- [8] Dhandayuthapani, B., Yoshida, Y., Maekawa, T., & Kumar, D. S. (2011). Polymeric scaffolds in tissue engineering application: A review. *Int. J. Polym. Sci.*, 2011(ii). <https://doi.org/10.1155/2011/290602>
- [9] Fernández, J., Auzmendi, O., Amestoy, H., Diez-Torre, A., & Sarasua, J. R. (2017). Mechanical properties and fatigue analysis on poly(ϵ -caprolactone)-polydopamine-coated nanofibers and poly(ϵ -caprolactone)-carbon nanotube composite scaffolds. *Eur. Polym. J.*, 94(February), 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.07.013>
- [10] Ghobeira, R., Asadian, M., Verduynde, C., Declercq, H., De Geyter, N., & Morent, R. (2018). Wide-ranging diameter scale of random and highly aligned PCL fibers electrospun using controlled working parameters. *Polym.*, 157(May), 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.10.022>

- [11] Górecka, Ż., Idaszek, J., Kołbuk, D., Choińska, E., Chlanda, A., & Świąszkowski, W. (2020). The effect of diameter of fibre on formation of hydrogen bonds and mechanical properties of 3D-printed PCL. *Mater. Sci. Eng. C*, 114, 111072. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111072>
- [12] Heher, P., Maleiner, B., Prüller, J., Teuschl, A. H., Kollmitzer, J., Monforte, X., ... Fuchs, C. (2015). A novel bioreactor for the generation of highly aligned 3D skeletal muscle-like constructs through orientation of fibrin via application of static strain. *Acta Biomater.*, 24(June), 251–265. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2015.06.033>
- [13] Ibrahim, H.M. & Klingner, A., (2020). A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications. *Polymer Testing*, 90, Article 106647.
- [14] Jana, S., Levengood, S. K. L., & Zhang, M. (2016). Anisotropic Materials for Skeletal-Muscle-Tissue Engineering. *Adv. Mater.*, 28(48), 10588–10612. <https://doi.org/10.1002/adma.201600240>
- [15] Kim, B., & Mooney, D. J. (2000). Scaffolds for Engineering Smooth. *Scanning*, 122(June), 210–215.
- [16] Kim, W. J., Kim, M., & Kim, G. H. (2018). 3D-Printed Biomimetic Scaffold Simulating Microfibril Muscle Structure. *Adv. Funct. Mater.*, 28(26), 1–12. <https://doi.org/10.1002/adfm.201800405>
- [17] Li, Y., & Wan, W. (2017). Exploring polymer nanofiber mechanics. *IEEE Nanotechnol. Mag.*, 11(September), 16–28.
- [18] Moyle, L. A., Jacques, E., & Gilbert, P. M. (2020). Engineering the next generation of human skeletal muscle models: From cellular complexity to disease modeling. *Curr. Opin. Biomed. Eng.*, 16, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2020.05.006>
- [19] Ozbolat, I. T., & Hospodiuk, M. (2016). Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting. *Biomater.*, 76, 321–343. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.10.076>
- [20] Powell, C. A., Smiley, B. L., Mills, J., & Vandenburg, H. H. (2002). Mechanical stimulation improves tissue-engineered human skeletal muscle. *Am. J. Physiol. - Cell Physiol.*, 283(5), 1557–1565. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00595.2001>
- [21] Qazi, T. H., Mooney, D. J., Pumberger, M., Geißler, S., & Duda, G. N. (2015). Biomaterials based strategies for skeletal muscle tissue engineering: Existing technologies and future trends. *Biomater.*, 53, 502–521. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.02.110>
- [22] Roberts, T. J. (2016). Contribution of elastic tissues to the mechanics and energetics of muscle function during movement. *J. Exp. Biol.*, 219(2), 266–275. <https://doi.org/10.1242/jeb.124446>
- [23] Sardenberg, T., Müller, S. S., Silveiras, P. R. de A., Mendonça, A. B., & Moraes, R. R. de L. (2003). Assessment of mechanical properties and dimensions of suture threads utilized in orthopedic surgeries. *Acta Ortop. Bras.*, 11(2), 88–94. <https://doi.org/10.1590/s1413-78522003000200004>
- [24] Shanmugam, V., Johnson, D.J., Babu, K., Rajendran, S., Veerasimman, A., Marimuthu, U., Singh, S., Das, O., Neisiany, R. E., Hedenqvist, M. S., Berto, F., & Ramakrishna. S. (2020) The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites prepared through the additive manufacturing. *Polymer Testing.*, 93(October), 106925. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106925>
- [25] Shearn, J. T., Juncosa-Melvin, N., Boivin, G. P., Galloway, M. T., Goodwin, W., Gooch, C., ... Butler, D. L. (2007). Mechanical stimulation of tendon tissue engineered constructs: Effects on construct stiffness, repair biomechanics, and their correlation. *J. Biomech. Eng.*, 129(6), 848–854. <https://doi.org/10.1115/1.2800769>
- [26] Subbiah, T., Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S., & Ramkumar, S. S. (2005). Electrospinning of nanofibers. *J. Appl. Polym. Sci.*, 96(2), 557–569. <https://doi.org/10.1002/app.21481>
- [27] Sun, H., Mei, L., Song, C., Cui, X., & Wang, P. (2006). The in vivo degradation, absorption and excretion of PCL-based implant. *Biomater.*, 27(9), 1735–1740. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.09.019>
- [28] Tan, E. P. S., Ng, S. Y., & Lim, C. T. (2005). Tensile testing of a single ultrafine polymeric fiber. *Biomater.*, 26(13), 1453–1456. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.05.021>
- [29] USP_NF24. (2015). National Formulary, United States Pharmacopeial Convention (p. Rockville, MD). p. Rockville, MD.
- [30] Visco, A., Scolaro, C., Giamporcaro, A., De Caro, S., Tranquillo, E., & Catauro, M. (2019). Threads made with blended biopolymers: Mechanical, physical and biological features. *Polym.*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/polym11050901>
- [31] Von Fraunhofer, J., Storey, R., Stone, I., & Masterson, B. (1985). Tensile strength of suture materials. *J. Biomed. Mater. Res.*, 19(5), 595–600. <https://doi.org/10.1088/0950-7671/28/4/309>
- [32] Wang, J., Khodabukus, A., Rao, L., Vandusen, K., Abutaleb, N., & Bursac, N. (2019). Engineered skeletal muscles for disease modeling and drug discovery. *Biomater.*, 221(August), 119416. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.119416>
- [33] Wragg, N. M., Player, D. J., Martin, N. R. W., Liu, Y., & Lewis, M. P. (2019). Development of tissue-engineered skeletal muscle manufacturing variables. *Biotechnol. Bioeng.*, 116(9), 2364–2376. <https://doi.org/10.1002/bit.27074>

Biomarcadores en el diagnóstico temprano y tratamiento de cáncer

Biomarkers in the early diagnosis and treatment of cancer

Melissa Camacho-Sánchez¹, Luis Alfredo Leandro-Vargas², Montserrat Mendoza-Salas³, Natalie Meza-Gutiérrez⁴, Fabricio Montero-Zúñiga⁵

Fecha de recepción: 22 de noviembre, 2021

Fecha de aprobación: 3 de abril, 2022

Camacho-Sánchez, M; Leandro-Vargas, L.A; Mendoza-Salas, M; Meza-Gutiérrez, N; Montero-Zúñiga, F. Biomarcadores en el diagnóstico temprano y tratamiento de cáncer. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 109-117.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.6002>

- 1 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: melicxs@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-8955-838X>
- 2 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: luis03leandro@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1053-0083>
- 3 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: montserrat@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1200-7456>
- 4 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: nataliemgz1508@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5438-3014>
- 5 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fabriciomz24@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-9351-7775>

Palabras clave

Antígeno prostático específico; miARN; hormona β -HCG; pruebas preclínicas; cáncer de próstata.

Resumen

En el presente escrito se destaca la importancia que tienen los biomarcadores en el área biomédica para el desarrollo de tecnologías que permiten el diagnóstico temprano y tratamiento de enfermedades como el cáncer. Se recalcan tres de los biomarcadores para el cáncer que han demostrado ser efectivos para su tratamiento: el antígeno prostático específico (PSA), el cuál es de suma importancia al determinar recurrencias de cáncer de próstata y evaluar la respuesta al tratamiento, el micro ARN (miARN), el cual se muestra alterado en células cancerígenas, y la hormona β -HCG. Este último se puede emplear como marcador tumoral para varios tipos de cáncer y se ha determinado que esta hormona puede actuar como inhibidora de la apoptosis y estimula el crecimiento de células cancerígenas. Además, existe una relación directa entre la concentración de β -HCG y la agresividad del cáncer.

Keywords

Prostate specific antigen; miRNA; β -HCG hormone; preclinical tests; prostate cancer.

Abstract

In this paper points up the importance of biomarkers in the biomedical area for the development of technologies that allow early diagnosis and treatment of diseases such as cancer. Three of the biomarkers for cancer that have been shown to be effective for its treatment are highlighted: the prostate specific antigen (PSA), which is of utmost importance when determining recurrences of prostate cancer and evaluating the response to treatment, micro RNA (miRNA), which is altered in cancer cells, and the hormone β -HCG. The latter can be used as a tumor marker for various types of cancer and it has been determined that this hormone can act as an inhibitor of apoptosis and stimulate the growth of cellular cancers. Furthermore, there is a direct relationship between the concentration of β -HCG and the aggressiveness of the cancer.

Introducción

El cáncer es una de las mayores problemáticas de salud, y una de las enfermedades que ocasionan más muertes a nivel mundial, siendo hoy en día la segunda mayor causa de muerte en los Estados Unidos [1],[2]. En 2020, el diagnóstico y tratamiento de cáncer se vieron obstaculizados por las medidas tomadas ante la incidencia de la enfermedad COVID-19, pudiendo ocasionar incluso un aumento en la mortalidad; sin embargo, estos efectos de la pandemia serán cuantificables hasta futuros años por el retraso de difusión de los datos de vigilancia basados en la población [3].

Los biomarcadores son alteraciones celulares, bioquímicas o moleculares que pueden llegar a ser cuantificables en medios biológicos tales como tejidos, células o fluidos corporales [4]. Estos se utilizan como indicadores del estado biológico para determinar de una manera objetiva el proceso fisiológico o patológico en el organismo, que ocurren tanto en la salud, enfermedad, como en otras situaciones [5]. Por lo tanto, en el campo de la salud humana, el desarrollo, validación y uso de los biomarcadores se incrementa cada vez más ya que la evaluación de una muestra biológica mediante el uso de biomarcadores permite establecer una relación

entre la etiología y la enfermedad, minimizando de esta manera efectos adversos; permitiendo así un diagnóstico adecuado, una intervención preventiva efectiva, desarrollo y evaluación de tratamientos y la identificación de individuos sensibles [6].

En investigaciones de cáncer, los biomarcadores hacen referencia a sustancias o procesos que son indicativos de procesos cancerígenos en el cuerpo [7]. En este caso, las investigaciones se han enfocado en entender las alteraciones que ocurren a nivel molecular. Durante la patogénesis y el desarrollo, las células cancerígenas adquieren alteraciones significativas en moléculas como ADN, ARN, miARN, ARNm y proteínas; por lo que en las metodologías para el diagnóstico de cáncer se han basado en estos cambios moleculares, inicialmente como una investigación básica y gradualmente trasladándose a su uso clínico [8].

En el presente documento se analiza algunos de los biomarcadores contra el cáncer que actualmente se perfilan en evaluaciones pre-clínicas como factibles y relevantes para el cáncer: el antígeno prostático específico (PSA), el micro ARN (miARN) y la hormona β -HCG. Para cada uno se analiza a nivel general su naturaleza molecular, cómo son capaces de cumplir una función de biomarcadores para la detección temprana y seguimiento de la enfermedad; además de abordar las principales ventajas, desventajas y limitaciones que se han reportado para su utilización.

Biomarcadores y cáncer

El uso de biomarcadores de manera clínica se considera de bajo costo, simple, permite múltiples análisis en corto tiempo, ayuda a prevenir problemas éticos en pruebas clínicas, entre otros. Todos estos aspectos se consideran ventajas de los biomarcadores, lo que los hace atractivos en comparación a otros métodos clínicos [9]. En el área de la oncología se pueden utilizar como parámetros para predecir la supervivencia. De la misma forma, se utilizan en el diagnóstico temprano y en el monitoreo del tratamiento [10]. Un aspecto importante en la elección de biomarcadores para uso clínico es el seguimiento de pautas como las de Bradford Hill; las cuales ayudan a conocer la relación de este biomarcador con el trastorno clínico que con el que se desea trabajar. Además, se debe tomar en cuenta aspectos como: la validez clínica del proceso, la respuesta, grado de invasividad, que sea de bajo costo, fácil de ejecutar y tiempo para obtención de los resultados, etc. [9].

Algunos ejemplos de biomarcadores utilizados en el diagnóstico de distintos tipos de cáncer son los clínicos con los sitios metastásicos, de sangre con células T, fecales de microbiota intestinal, entre otros. Todos estos biomarcadores tienen grandes aportes en el pronóstico de la sobrevivencia y el monitoreo de tratamientos en distintos tipos de cáncer. Esto indica algunos de los beneficios del uso de estas pruebas clínicas para el diagnóstico y tratamiento del cáncer [11].

PSA: Antígeno prostático específico

El PSA, antígeno prostático específico, o calicreína 3 humana (hK3), es una calicreína glandular con abundante expresión en la próstata codificada por *KLK3gene* [12], es producido principalmente por el epitelio acinar y ductal de la próstata y se secreta en la luz, donde su función es escindir la semenogelina I y II en el coágulo seminal [13].

El PSA medible que circula dentro de la sangre se encuentra unido a proteínas, como PSA complejo (cPSA), o de forma libre (no unido) (fPSA) [14]. En hombres sanos el PSA libre constituye el 20% - 30% del PSA total, mientras que el 5% aproximadamente corresponde al cPSA unido a proteasas séricas (principalmente ACT) [15], [16]. Esta fracción escindida está relativamente disminuida en el cáncer de próstata; es decir, el porcentaje de PSA libre es inferior

en hombres con cáncer de próstata y por el contrario la cantidad de PSA complejado es mayor en comparación con aquellos que tienen una próstata normal; por lo tanto, se recomienda determinar el PSA libre para evitar la realización de biopsias innecesarias [17] [18].

No obstante, para mejorar la especificidad del PSA en cáncer de próstata se recomienda la utilización de diferentes formas moleculares de PSA en suero como el cociente PSA total/PSA libre en donde la mayoría de los estudios emplean un cociente inferior a 20 como sospecha de neoplasia [19].

Ventajas y limitaciones de su uso

A pesar de su utilidad, este biomarcador presenta varias limitaciones, principalmente la inespecificidad del aumento de los niveles de PSA, ya que no es exclusivo de neoplasia, la hipertrofia benigna de próstata, la prostatitis, los infartos prostáticos y las manipulaciones de la vía urinaria como las biopsias, cistoscopias o cirugías prostáticas son otras causas frecuentes de su elevación, por tanto, es necesario complementar esta prueba con el tacto rectal [18].

Esta baja especificidad provoca que su papel en la detección del cáncer sea controversial ya que se generan múltiples falsos positivos en pacientes con hiperplasia benigna de próstata (HPB) [12]; además, ninguna de las formas de PSA ha demostrado reducir el número de biopsias innecesarias, el riesgo de perder un cáncer tratable o mejorar los resultados clínicos [17].

A pesar de esto, la falta de especificidad de la prueba de PSA es menos crítica en el seguimiento de pacientes con un diagnóstico establecido, contribuyendo en la evaluación de la respuesta a las intervenciones terapéuticas y en la detección de la recidiva tumoral [20].

Por otro lado, es posible identificar un cáncer agresivo con el uso del panel de calicreína, que incluye la medición de PSA total, *t*PSA, *i*PSA (isoforma de *t*PSA que está intacto, inactivo), hK2; con ello se genera un cálculo de riesgo llamado 4Kscore que combina el historial de la biopsia con la edad del paciente y el tacto rectal, con ello se obtiene información sobre la probabilidad de tener un cáncer de próstata de alto riesgo con una puntuación de Gleason de 7 o superior [12]. La National Comprehensive Cancer Network recomendó el uso de esta prueba para la detección de cáncer de próstata agresivos en pacientes que nunca se han sometido a una biopsia o después de una biopsia negativa [12].

MicroARN

Los microARN son fragmentos de ácido ribonucleico no codificantes que regulan la expresión génica. Están involucrados en una variedad de procesos biológicos que regulan la actividad celular incluyendo la proliferación celular, la apoptosis, respuestas al estrés, entre otros [21], [22]. Se pueden utilizar como potenciales biomarcadores para el diagnóstico y pronóstico de una variedad de enfermedades como el cáncer, trastornos neurológicos, enfermedades cardiovasculares y diabetes tipo II [23].

Mediante el uso de métodos de creación de perfiles de alto rendimiento, se han detectado diferencias en el miARNoma (complemento completo de miARN en un genoma) en tejidos normales versus tejidos enfermos con diferentes etapas de afectación. Estas diferencias con frecuencia recurren en marcas de miARN específicas del tumor, que son muy útiles para diagnosticar el tejido de origen de la neoplasia pues tienen una alterada expresión de miARN (subrepresentados o sobreexpresados) y, en ocasiones, también subtipos de tumores específicos [21], [23].

Los miARN son transcritos por una ARN polimerasa II en un precursor llamado pri-miARN. Una ribonucleasa de dsRNA específica llamada Drosha en conjunto con su pareja vinculante (DGCR8) divide el pri-miRNA en un precursor de ARN en forma de horquilla (llamado pre-miRNA). Este mismo es trasladado hacia el citoplasma mediante el exportin 5, el cual es escindido en un dúplex de 18-24 nt por un complejo ribonucleoproteico (compuesto por una ribonucleasa III (Dicer) y una proteína de unión al ARN de respuesta transactivante del VIH-1 (TRBP)). Finalmente, este dúplex interactúa con un grande complejo proteico llamado complejo silenciador inducido por ARN que impulsa una hebra del dúplex (llamado miARN maduro) hacia la región 3' no traducida del ARNm diana [21], [22].

En general, el propósito de los miARN es modular la expresión del ARNm diana ya sea por escisión de ARNm o por represión traduccional. Sin embargo, se ha descubierto que los miARN también pueden aumentar la expresión de un ARNm diana y apuntar a varias transcripciones diferentes. Por ejemplo, se ha demostrado que un grupo de dos miARNs pueden afectar la expresión de aproximadamente el 14% del genoma humano en una línea celular leucémica [21].

Avances recientes en el campo de los microARN sugieren que la variación genética o polimorfismos presentes en miARNs están asociados con la prognosis o progresión de enfermedades y también están relacionados con las diferentes respuestas a los fármacos, lo cual permite que surjan herramientas poderosas para estudiar la biología de las enfermedades [23]. Por ejemplo, se ha observado que los miARN se expresan diferentemente en la sangre de pacientes con cáncer en comparación a donadores sanos, proporcionando una justificación para la detección de miARN y la circulación de biomarcadores diagnósticos y pronósticos [21].

Ventajas y limitaciones de su uso

Una gran ventaja es que el análisis de la expresión de miARN se puede realizar con éxito en muestras menos conservadas, tales como tejidos fijados con formol o incrustadas en parafina [21].

La detección de miARN exosómicos en el microambiente tumoral puede proporcionar una mejor herramienta para el desarrollo de nuevos tratamientos personalizados para pacientes con cáncer. La detección de miARN-polimorficos y variantes de miARN pueden ayudar a mejorar el diagnóstico, tratamiento y pronóstico de los pacientes, pues están involucrados estrechamente en la tumorigenesis y su pronóstico [23]. Los niveles de miARN tienden a estar asociados a la ocurrencia y progresión de distintos tipos de cáncer, como el de hígado, y los miARN son característicos porque pueden ser regulados anormalmente por modificaciones epigenéticas, como alteraciones en la metilación del ADN, modificaciones de ARN e histonas, que en última instancia conducen a la transformación de células malignas [24]. Además, su investigación tiene profundas implicaciones en los campos de la farmacocinética genómica y medicina de precisión, por ejemplo, al estudiar cómo la propia herencia genética de miARN-polimorficos de cada individuo puede afectar la respuesta del cuerpo a los medicamentos [23].

Una desventaja es que, a pesar de varias estrategias que se han propuesto para identificar experimentalmente genes diana de miARN, no hay métodos en la actualidad completamente reproducibles que logren abordar este problema. La identificación del gen diana de miARN sigue siendo uno de los mayores desafíos en investigación funcional de miARN [21]. Quedan todavía múltiples transcripciones de miARN por ser investigadas, se necesitan investigaciones más fundamentales para entender exactamente las funciones del miARN y sus roles funcionales en la biología del cáncer. Adicionalmente, es necesario aclarar aún más las posibles funciones biológicas de los miARN circulantes, particularmente los mecanismos de miARN que contienen cuerpos multivesiculares (MVBs) para: la comunicación célula-célula, evasión inmunitaria

tumoral y los microambientes tumorales, pues todavía son elusivos. Además, los métodos para su detección deben ser más optimizados, para asegurarse que sean constantes y de confianza, utilizando un tamaño de muestra lo suficientemente grande [22].

Hormona BETA HCG

La HCG es una hormona glicoproteica compuesta por 2 subunidades unidas por enlaces no covalentes (α y β). La subunidad α es común, mientras que la subunidad β (β -hCG) es exclusiva de la hCG y le confiere actividad biológica a la hormona [25], [26]. Además, la β -HCG es una molécula con función independiente [27].

Se ha demostrado que la presencia de β -HCG libre constituye un potencial marcador producido por una variedad de tumores [27]. El nivel de concentración de esta hormona sirve como marcador clínico asociado con el cáncer de testículo, páncreas y próstata, así como con el embarazo [26]. Adicionalmente, algunos hallazgos muestran la relación de pacientes positivos para hCG con un tipo determinado de cáncer epitelial. Esto está sumamente relacionado con la introducción de un radioinmunoensayo que detecta la subunidad libre de hCG, además de la hormona intacta. Una extensa caracterización inmunoquímica ha demostrado que, si bien la placenta y los tumores de células germinales producen abundantemente hCG intacta, es la subunidad β libre la que es producida de forma predominante por tumores epiteliales comunes [28]. Se considera que un paciente presenta una concentración normal de β -hCG cuando esta es ≤ 5 IU/L y se considera elevada cuando es mayor a dicho valor [29].

Se ha reportado que la β -hCG puede inhibir la apoptosis o estimular el crecimiento de células cancerosas. Además, los niveles séricos elevados de β -hCG se correlacionan con una mayor agresividad del cáncer [29]. Sobre esto, se ha informado que la β -hCG disminuye la expresión de E-cadherina, lo que provoca la migración e invasión de las células del cáncer de próstata [27].

Ventajas y limitaciones de su uso

Como se mencionó anteriormente, el uso de este biomarcador presenta la ventaja de que existe una relación directa entre la concentración de β -hCG y la severidad de la afección. De esta manera, se puede tener una noción de la prognosis del paciente y, por lo tanto, del tratamiento requerido. Asimismo, se pueden medir los niveles de la hormona antes, durante y después del tratamiento para determinar su efectividad [30].

Por otro lado, existe una desventaja significativa en lo que respecta a la β -hCG como biomarcador y es que esta es poco específica y presenta baja sensibilidad. Debido a esta razón, se debe aplicar en conjunto con otros exámenes clínicos y no como prueba única [30].

Otro factor importante a considerar es la existencia de una condición llamada Síndrome de hCG Familiar. Este corresponde a una enfermedad hereditaria poco común que se presenta tanto en hombres como mujeres con una prevalencia estimada de 1 por cada 60000 habitantes. Las personas afectadas producen una forma de hCG mutada con numerosas alteraciones en la región del péptido C-terminal, que dan como resultado niveles de hCG persistentemente elevados (10-200 UI/L) que pueden llevar a sospechar de embarazo o cáncer en la persona afectada. Por lo tanto, se requiere la confirmación de los niveles de hCG en suero y orina con diferentes ensayos de la mano con observaciones clínicas para, así, no determinar un diagnóstico incorrecto [31].

Conclusiones y perspectivas futuras

El uso de los biomarcadores de manera clínica para el diagnóstico y monitoreo del tratamiento del cáncer es una alternativa no invasiva, de bajo costo y de mayor facilidad en comparación a otros métodos clínicos. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta aspectos importantes como la relación del biomarcador con la enfermedad con la que se quiere trabajar.

Los marcadores moleculares como el PSA no son completamente específicos y precisos, por tanto, no reemplaza la biopsia prostática para realizar un diagnóstico de cáncer de este órgano [18], ya que, según sea el caso, un valor alto o bajo no implica necesariamente la existencia o ausencia de un cáncer de próstata. Sin embargo, el PSA sigue siendo sumamente útil para evaluar la respuesta al tratamiento, determinar la extensión del cáncer e incluso detectar tumores de alto riesgo [17].

En el caso de la β -hCG, esta puede ser utilizada para determinar distintos tipos de cáncer. Sin embargo, presenta la desventaja de ser poco específica y presentar baja sensibilidad, por lo que solo se puede aplicar en conjunto con otras pruebas. En contraparte, puede ser muy útil para comprobar la severidad del cáncer, debido a que existe una correlación entre la cantidad de β -hCG y la gravedad del padecimiento.

Desafortunadamente, el campo de los biomarcadores está estancado y la mayoría de los biomarcadores propuestos se han dejado abandonados o no han logrado ser validados clínicamente por falta de robustez en los ensayos pre-clínicos necesarios para su implementación clínica [32]. Sin embargo, el continuo estudio de estas moléculas para el tratamiento de cáncer puede guiar a alcanzar el objetivo de las terapias personalizadas del cáncer, las cuales pretenden brindar la droga correcta en el momento indicado [33]. Esto se puede alcanzar gracias a marcadores de pronóstico, que permiten determinar el tipo de alteración y la agresividad de la enfermedad; los marcadores predictivos, que permiten predecir la respuesta o resistencia a terapias específicas, y marcadores farmacodinámicos, que permiten identificar pacientes que son más propensos a desarrollar efectos secundarios no deseados ante diversas terapias [34].

Por lo tanto, desarrollar estudios sobre los biomarcadores para el tratamiento de cáncer y realizar las pruebas clínicas para su validación puede conllevar al desarrollo de terapias y tratamientos efectivos para diversas enfermedades que son de difícil tratamiento, como lo es el caso del cáncer, por lo que el avance en esta área es de gran importancia para la industria biomédica y la calidad de vida de los pacientes.

Referencias

- [1] F. Islami, A. Goding Sauer, K.D. Miller, R.L. Siegel, S.A. Fedewa, E.J. Jacobs, et al. "Proportion and number of cancer cases and deaths attributable to potentially modifiable risk factors in the United States". *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. vol. 68, no.1, pp: 31–54, 2018
- [2] X. Wang, K.E. Kaczor-Urbanowicz, D.T.W. Wong, "Salivary biomarkers in cancer detection". *Medical Oncology. Humana Press Inc.*, vol. 34, 2017.
- [3] R.L. Siegel, K.D. Miller, H.E. Fuchs, A. Jemal, "Cancer Statistics, 2021". *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. vol. 71, no. 1, pp: 7–33, 2021.
- [4] R. Mayeux, "Biomarkers: Potential Uses and Limitations". *The Journal of the American Society for Experimental NeuroTherapeutics*, vol. 1, no. 2, pp: 182-188, 2004.
- [5] G. Palacios, R. Pedrero-Chamizo, N. Palacios, B. Maroto-Sánchez, S. Aznar, M. González-Gross, "Biomarcadores de la actividad física y del deporte". *Rev Esp Nutr Comunitaria*. vol. 21, pp: 235–42, 2015.
- [6] V. Arango, S. Sandra, "Biomarcadores para la evaluación de riesgo". *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, vol. 30, no. 1, pp:75–82, 2012.

- [7] M. Verma, S. Rosenfeld, "Challenges for Biomarkers in Cancer Detection". *Annals of The New York Academy of Sciences*. vol. 1022, pp: 9–16, 2004.
- [8] S. Sethi, S. Ali, P.A. Philip, F.H. Sarkar, "Clinical advances in molecular biomarkers for cancer diagnosis and therapy". *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 14, pp. 71–84, 2013.
- [9] J. K. Aronson and R. E. Ferner, "Biomarkers—A General Review," *Current Protocols in Pharmacology*, vol. 76, no. 1, 2017. doi: 10.1002/cpph.19.
- [10] J. L. da Silva, N. C. Cardoso Nunes, P. Izetti, G. G. de Mesquita, y A. C. de Melo, "Triple negative breast cancer: A thorough review of biomarkers," *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, vol. 145, p. 102855, 2020. doi: 10.1016/j.critrevonc.2019.102855.
- [11] K. Buder-Bakhaya and J. C. Hassel, "Biomarkers for Clinical Benefit of Immune Checkpoint Inhibitor Treatment—A Review From the Melanoma Perspective and Beyond," *Frontiers in Immunology*, vol. 9, 2018, doi: 10.3389/fimmu.2018.01474.
- [12] X. Filella y L. Foj, "Prostate Cancer Detection and Prognosis: From Prostate Specific Antigen (PSA) to Exosomal Biomarkers". *Int J Mol Sci*, vol. 17, no. 11, pp. 1784, Oct. 2016. doi: <http://doi.org/10.3390/ijms17111784>
- [13] H. Lilja, J. Oldbring, G. Rannevik y C. Laurell, "Seminal vesicle-secreted proteins and their reactions during gelation and liquefaction of human semen". *J Clin Invest*, vol. 80, no. 2, pp. 281-285, 1987. doi: 10.1172/JCI113070.
- [14] M. B. Gretzer y A. W. Partin, "PSA markers in prostate cancer detection". *Urol Clin North Am*, vol. 30, no. 4, pp. 677-686, Nov. 2003. doi: 10.1016 / s0094-0143 (03) 00057-0.
- [15] U. H. Stenman, J. Leinonen, H. Alfthan, S. Rannikko, K. Tuhkanen y O.A. Alfthan, "Complex between Prostate-specific Antigen and α 1-Antichymotrypsin Is the Major Form of Prostate-specific Antigen in Serum of Patients with Prostatic Cancer: Assay of the Complex Improves Clinical Sensitivity for Cancer". *Cancer Res*, vo. 51, no. 1, 1991.
- [16] S. P. Balk, Y. J. Ko y G. J. Bubley, "Biology of Prostate-Specific Antigen". *J Clin Oncol*, vol. 21, no. 2, pp. 383-91, Sep. 2016. doi: 10.1200 / JCO.2003.02.083
- [17] M. Adhyam y A. K. Gupta, "A Review on the Clinical Utility of PSA in Cancer Prostate". *Indian J Surg Oncol*, vol. 3, no. 2, pp. 120-129, Jun. 2012. doi: 10.1007 / s13193-012-0142-6.
- [18] I. Hermida Lazcano, et ál., "Marcadores Tumorales". *Rev Clin Med Fam*, vo. 9, no. 1, pp. 31-42, Feb. 2016.
- [19] E. Gregorio, et ál., "Comparison between PSA density, free PSA percentage and PSA density in the transition zone in the detection of prostate cancer in patients with serum PSA between 4 and 10 ng/ml". *Int Braz J Urol*, vol. 33, no. 2, pp. 151-160, 2007. doi: 10.1590 / s1677-55382007000200004.
- [20] C. M. Sturgeon, et ál., "National Academy of Clinical Biochemistry Laboratory Medicine Practice Guidelines for Use of Tumor Markers in Testicular, Prostate, Colorectal, Breast, and Ovarian Cancers". *Clin Chem*, vol. 54, no. 12, pp. e11-79., Dic. 2008. doi: 10.1373 / clinchem.2008.105601.
- [21] M. Fabbri, "miRNAs as molecular biomarkers of cancer". *Expert Review of Molecular Diagnostics*, vol. 10, no. 4, pp. 435-444, 2010. doi: 10.1586/erm.10.27
- [22] H. Lan, H. Lu, X. Wang, H. Jin, "MicroRNAs as potential biomarkers in cancer: opportunities and challenges". *BioMed Research International*, vol. 2015, Article ID 125094, 2015. doi: 10.1155/2015/125094
- [23] P.J. Mishra, "MicroRNAs as promising biomarkers in cancer diagnostics". *Biomark Res*, vol. 2, no. 19, 2014. doi: 10.1186/2050-7771-2-19
- [24] R. Ma, M. Zhao, X. Zou, J. Zhou and Z. Bai, "MicroRNA polymorphism: A target for diagnosis and prognosis of hepatocellular carcinoma? (Review)". *Oncol Lett.*, vol. 21, no. 4, 2021 doi: 10.3892/ol.2021.12586
- [25] A.C. Kölbl, K. Schlenk, N. Behrendt, U. Andergasse, "The importance of hcg in human endometrial adenocarcinoma and breast cancer". *International Journal of Biological Markers*, vol 33, no. 1, pp. 33-39, 2018.
- [26] C. Haslam, S. Damiani, T. Whitley, P. Davey, E. Ifeakor, S. Awan, "Label-Free Sensors Based on Graphene Field-Effect Transistors for the Detection of Human Chorionic Gonadotropin Cancer Risk Biomarker". *Diagnostics*, vol. 8, no. 1, 2018.
- [27] Z. Li, C. Li, L. Du, Y. Zhou, W. Wu, "Human Chorionic Gonadotropin β Induces Migration and Invasion via Activating ERK1/2 and MMP-2 in Human Prostate Cancer DU145 Cells". *PLoS ONE*, vol. 8, no. 2, 2013.
- [28] R.K. Iles, P.J. Delves, S.A. Butler, "Does hCG or hCG β play a role in cancer cell biology?" *Molecular and Cellular Endocrinology*, vol. 329, no. 1-2, pp. 62–70, 2010.

- [29] S.K. Sengodan, R. Nadhan, R.S. Nair, S.K. Hemalatha, V. Somasundaram, R.R. Sushama, et al., "BRCA1 regulation on β -hCG: A mechanism for tumorigenicity in BRCA1 defective breast cancer". *Oncogenesis*, vol. 6, no. 9, 2017.
- [30] J.C. Marchán, "Gonadotropina coriónica humana, una hormona versátil y un marcador tumoral esencial en cáncer testicular de células germinales no seminomatosas". *Revista Colombiana de Endocrinología, Diabetes & Metabolismo*, vol. 6, no. 2, pp. 107–113, 2019.
- [31] C. Nwabuobi, S. Arlier, F. Schatz, O. Guzeloglu-Kayisli, C.J. Lockwood, U.A. Kayisli, "hCG: Biological functions and clinical applications". *International Journal of Molecular Sciences*, vol.18, no.10, pp. 1–15, 2017.
- [32] K. Mäbert, M. Cojoc, C. Peitzsch, I. Kurth, S. Souchelnytskyi, A. Dubrovská, "Cancer biomarker discovery: Current status and future perspectives". *International Journal of Radiation Biology*. vol. 90, no.8, pp:659–77, 2014.
- [33] A. Mordente, E. Meucci, G.E. Martorana, A. Silvestrini, "Cancer biomarkers discovery and validation: State of the art, problems and future perspectives". *Advances in Experimental Medicine and Biology*. pp: 9–26, 2015.
- [34] A. Kretschmer, D. Tilki, "Biomarkers in prostate cancer – Current clinical utility and future perspectives". *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, vol. 120, pp: 180–93, 2017.

Análisis de la situación actual de residuos marinos en Costa Rica

Marine litter present situation in Costa Rica

Lilliana Abarca-Guerrero¹, Andrea Acuña-Piedra²,
María Angélica Astorga-Pérez³, Karol Ulate-Naranjo⁴,
Susy Lobo-Ugalde⁵, Victoria Rudin-Vega⁶

Fecha de recepción: 10 de febrero, 2022

Fecha de aprobación: 7 de mayo, 2022

Abarca-Guerrero, L; Acuña-Piedra, A; Astorga-Pérez, M.A;
Ulate-Naranjo, K; Lobo-Ugalde, S; Rudin-Vega, V. Análisis
de la situación actual de residuos marinos en Costa Rica.
Tecnología en Marcha. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág.
118-134.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.6672>

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

Correo electrónico: lbarca@itcr.ac.cr

2 Escuela de Química, carrera de Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: anacuna@itcr.ac.cr

3 Consultora independiente, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: astorgaa487@gmail.com

4 Laboratorio de Estudios Marino Costeros, Universidad Nacional, Costa Rica.

Correo electrónico: karol.ulate.naranjo@una.ac.cr

5 Coordinadora del área de gestión integral de residuos sólidos. Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente (ACEPESA).

6 Directora. Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente (ACEPESA).

Palabras clave

Residuos marinos; fuentes de residuos; plan de gestión; sensibilización; normativa; monitoreo.

Resumen

Alrededor del año 2007 las Naciones Unidas indicaban preocupación por los residuos sólidos que estaban llegando al mar producto de las actividades en las zonas terrestres, así como propiamente las generadas en el mar, amenazando la salud de los océanos, la seguridad y calidad de los alimentos, la salud humana, el turismo costero y la fuente de trabajo de muchos pescadores, cuyo sustento depende del mar. Costa Rica cuenta con dos costas, una en el Océano Pacífico y otra en el mar Caribe, con abundantes recursos naturales tanto en los ecosistemas marinos como en los terrestres. Pero estos, se encuentran severamente amenazados debido al abuso que se ha dado a los recursos y a las actividades antropogénicas. Por lo anterior y sumándose al interés global de proteger los océanos, el gobierno de Costa Rica realiza el Plan Nacional de Residuos Marinos de manera participativa e intersectorial. Para ello se efectúa un análisis de línea base con información recolectada de literatura internacional y nacional, con talleres participativos donde se presenta la información de la situación actual de la gestión de residuos, con visitas a asociaciones de pescadores en el Pacífico y en el Caribe, entrevistas, cuestionarios y discusión de los temas relevantes para el país. El resultado de la recolección de la información es lo que se presenta en este artículo. En él se resume el aporte de las fuentes terrestres y marinas, el impacto a los ecosistemas, el monitoreo que se realiza, los distintos programas de educación sensibilización e información con que se cuenta, la normativa internacional y nacional, terminando con un análisis de las actividades de investigación, desarrollo y los retos para la innovación. Se presentan además conclusiones sobre el estado actual de la gestión de residuos marinos en los distintos ámbitos analizados.

Keywords

Marine litter; sources of marine litter; management plan; awareness; norms; monitoring

Abstract

In 2007, the United Nations indicated the concern around the impact of solid waste affecting the oceans as a result of land-based and marine activities, threatening the health of the oceans, food security, food quality, human health and tourism and livelihoods for those that depend on the ocean. Costa Rica has two coasts, one in the Pacific Ocean and the other in the Caribbean Sea, with abundant natural resources in both marine and terrestrial ecosystems. However, they are severely threatened due to the resources abuse and the anthropogenic activities. Due to the above and in addition to the global interest in protecting the oceans, the government of Costa Rica embarked in the formulation of the National Marine Litter Plan, with the participation of actors from all sectors. For this, a baseline analysis was carried out with information collected from international and national literature, with participatory workshops as a means for data collection, on site visits to fishermen's associations in the Pacific and the Caribbean, interviews, questionnaires and discussions about the relevant issues. The results of these enquires are presented in this article. It summarizes the contribution of land and marine-based sources, the impact on ecosystems, the monitoring activities that are carried out, the different education, awareness and information programs available, the international and national regulations, ending with an analysis of the research and development activities and the challenges for innovation. Conclusions are also presented on the current state of marine litter for the topics analyzed.

Introducción

Costa Rica es un país que posee abundantes recursos naturales con costas en ambos océanos y muchos ecosistemas marinos y terrestres. Estos son fuente de alimento y protección para distintas especies, incluidos los seres que ahí habitan. Las costas y sus habitantes dependen del turismo y la pesca como medio de subsistencia, pero los ecosistemas son frágiles y en este momento están siendo severamente degradados debido al abuso de los recursos y del impacto de las actividades humanas [1], [2], [3], [4], [5].

En el país, una gran cantidad de residuos no recolectados, están siendo transportados al mar a través de ríos y quebradas o bien por el viento y las lluvias. Adicionalmente, otra cantidad es aportada por actividades del sector pesquero y de navíos mercantes, tanqueros, turísticos y de pasajeros. A manera de ejemplo se han evidenciado zonas de acumulación de residuos, tan lejanas como la Isla del Coco [6] y otras más cercanas como la Reserva Natural Absoluta de Cabo Blanco [2].

Las Naciones Unidas reconocieron, en el 2007, el problema de los residuos marinos y el impacto que poseen, por lo que declaró el tema como un asunto de preocupación global e hizo un llamado para la acción a nivel internacional, regional y local [7].

En este contexto el gobierno de Costa Rica decidió realizar un Plan Nacional de Residuos Marinos para el cual, era necesario ejecutar un estudio de línea base que permitiera determinar la situación actual relacionada con esta temática. El objetivo de este artículo es presentar los resultados de la investigación realizada y aportar conocimiento para el desarrollo de ejes estratégicos que permitan prevenir y gestionar integralmente los residuos, que ingresan en las costas costarricenses tanto del Pacífico como del Caribe.

Marco teórico

Los residuos marinos, son definidos de acuerdo con el Programa de la Organización de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) como cualquier material sólido persistente, fabricado o procesado que se descargue, evacue o abandone en el medio marino y costero [8].

Según el Grupo Conjunto de Expertos de las Naciones Unidas sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino (GESAMP por sus iniciales en inglés), entre el 60 y el 80% de la contaminación marina mundial por residuos sólidos proviene de fuentes y actividades terrestres. Resulta alarmante e imposible de sostener en el largo plazo, que cada año cerca de 8 millones de toneladas de plástico terminan en los océanos [9].

La mayoría de los residuos provienen del vertido indiscriminado y su inadecuada gestión en tierra, lo que da como resultado la migración a alcantarillas, ríos y arroyos, fluyendo hacia las áreas costeras. Además, otras fuentes son los residuos que se quedan en las playas producto del turismo y finalmente aquellos generados directamente en el mar, los cuales pueden haber sido dispuestos deliberada o accidentalmente por embarcaciones de recreo y cruceros, barcos de pesca y de transporte marítimo. Se contabilizan en este grupo los entregados en puertos, muelles y marinas [10].

Metodología

El abordaje metodológico para la elaboración del Plan Nacional de Residuos Marinos para Costa Rica se llevó a cabo en cuatro etapas:

a. Revisión documental

Con el fin de sustentar la línea base y conocer de procesos similares desarrollados en otros países o regiones, se analizaron documentos que contenían información sobre Planes Regionales y Nacionales para la gestión de los residuos marinos, leyes, reglamentos y artículos en revistas científicas sobre el tema.

b. Identificación de actores clave

Con base en el conocimiento de la realidad nacional y las lecturas realizadas, se hizo una primera identificación de actores clave para, de manera conjunta, analizar la situación actual del país y la problemática de los residuos marinos. Estos se agruparon en instituciones del sector público y municipal; empresas y organizaciones gremiales del sector privado (turismo, productores, gestores de residuos, comercio, entre otros); Organizaciones no Gubernamentales (ONG) y otras organizaciones de la sociedad civil que realizan labores de educación ambiental, limpieza de espacios públicos tales como parques, ríos y playas, entre otros; academia vinculada con investigación y monitoreo y organizaciones de cooperación internacional con proyectos relacionados y gobiernos amigos.

Esta primera lista se fue ampliando conforme se continuó el proceso y la identificación de nuevos actores. Además, las investigadoras se basaron en la matriz de influencia e importancia de actores utilizada en el Manual para la Elaboración de Planes Municipales de Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) para crear un instrumento en Excel y categorizarlos. Ese manual define la importancia como la “prioridad que tiene en el Plan Nacional de Residuos Marinos, la satisfacción de las necesidades e intereses del actor social y la influencia como el “grado en que un actor puede persuadir o presionar a otros en la toma de decisiones o en la implementación de acciones”.

c. Elaboración y aplicación de instrumentos para recolección de información

El análisis documental sirvió para la identificación de temas o información que se podía profundizar o actualizar con los actores identificados. Por lo tanto, se elaboraron varios tipos de instrumentos:

- Cuestionario en línea enviado a gestores ambientales municipales y a representantes de ONGs
- Guías de entrevistas específicas para diversos actores
- Encuesta para empresas del sector privado que pueden tener una incidencia en medidas para la reducción de la contaminación

Se obtuvo respuesta del sector gubernamental, municipalidades urbanas y costeras, ONGs, encargados de proyectos y/o comisiones de cooperación internacional, sector privado, sociedad civil e instituciones intersectoriales. Toda la información obtenida fue sistematizada e integrada a la línea base.

d. Ejecución de talleres y trabajo de comisiones con actores clave

Se realizaron cinco talleres con actores clave con diferentes objetivos cada uno. A continuación, éstos se detallan:

I Taller: Con una asistencia de 114 personas (65 mujeres y 49 hombres) de todos los sectores. El objetivo fue presentar el proyecto de elaboración del plan, validar la información recopilada y obtener datos adicionales para la línea base. Se desarrolló mediante una combinación de exposición en plenaria y trabajo en grupos.

II Taller: Este taller se centró en la formulación de la Visión del Plan, la definición de Ejes Estratégicos y Objetivos Específicos de cada Eje. Debido a los objetivos del taller y la metodología de trabajo utilizada, se convocaron a menos personas, teniendo una asistencia de 59 individuos (23 hombres y 36 mujeres).

Se combinó el trabajo en grupos, con sesiones en plenaria donde, la selección de la Visión se realizó mediante la herramienta de Jam board, que permitió a todas las personas votar y proponer mejoras.

Posteriormente, en el mismo II taller cada integrante del equipo técnico continuó trabajando en pequeñas comisiones con las personas integrantes de los grupos conformados por Eje. Esta actividad se realizó con el objetivo de concretar las acciones de cada Objetivo Específico.

III Taller: Este taller fue exclusivo con el sector privado. Previo a este, se realizó un acercamiento a un total de 29 empresas por medio de entrevistas/encuestas/un formulario/un cuestionario, que permitió conocer iniciativas y proyectos que se encontraban ejecutando o planificando, y que estuvieran vinculados a la gestión de residuos. Se obtuvieron 11 respuestas por parte de cámaras de empresarios, empresas productoras, distribuidoras, transformadoras, empresas que representan cosméticos, aromas, productos de limpieza, una unidad de cumplimiento voluntaria de medicamentos y una unidad de cumplimiento de residuos electrónicos.

Posteriormente se convocó al taller, donde asistieron 10 empresas. El objetivo de este fue que los representantes de las empresas e instituciones tuvieron un intercambio de ideas sobre cómo puede ser su participación en el desarrollo del plan, considerando su experiencia.

IV Taller: En este taller se continuó avanzando en la formulación del Plan Nacional, el taller se dividió en dos etapas. El objetivo de la primera parte fue trabajar en plenaria comentarios y sugerencias con propuestas de mejora, sobre los objetivos específicos y acciones de cada eje estratégico que habían sido previamente formulados. Se contó con la participación de 85 personas (41 hombres y 44 mujeres).

En la segunda etapa participaron 42 personas (19 hombres y 23 mujeres). Se retomó el trabajo en los subcomités según cada eje para continuar el proceso de construcción del PNRM, enfocados en propuestas de mejora de las acciones y la creación de los indicadores de logros.

V Taller: El objetivo de este Taller fue validar el contenido de la propuesta de PNRM, mediante una sesión plenaria y organizado según las diversas partes que componen el PNRM. Previamente al taller, se envió una copia del borrador del Plan con el fin de que las personas invitadas pudieran enviar sus comentarios y aportes por medio de un formulario diseñado y facilitado vía correo electrónico, también, las personas participantes realizaron sus aportes en el taller mediante el chat de la plataforma virtual o expresados de forma verbal.

En el taller participaron 76 personas (38 hombres y 38 mujeres).

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados del análisis de las fuentes terrestres y marinas de contaminación, así como, el impacto a los ecosistemas y el monitoreo:

Fuentes terrestres

En la literatura internacional cuando se discute sobre fuentes terrestres de contaminación se hace referencia a tres causas generales: gestión deficiente de los residuos, residuos intencionalmente dispuestos al ambiente y residuos no intencionalmente dispuestos al ambiente. Además, se señalan como principales fuentes la industria, el turismo, la agricultura, la construcción, alimentos, artículos del hogar, envases, refrescos y el comercio minorista. Se indica que llegan estos residuos a ríos, playas y mares por medio del alcantarillado pluvial, los

residuos botados por las personas en las calles, la escorrentía en vertederos ubicados cerca de ríos o zonas costeras, el viento, el turista que visita playas o ríos y no maneja adecuadamente sus residuos [11].

Según los últimos datos del Ministerio de Salud [12], en el 2019 los residuos ordinarios generados en el país fueron 1 343 608 toneladas (aproximadamente 3732 ton/día). De estos el 79,71% corresponde a los hogares y el 20,29% a comercios e instituciones. En cuanto a la composición, los residuos orgánicos representan cerca del 52%, el papel y el cartón 12,5% y los plásticos un 12,3% (165 666, 86 toneladas anuales o 459 ton/día).

De los residuos generados se recolectan y llevan a disposición final el 93,25% (1 252 901 toneladas anuales), de los cuales el 86,5 % se disponen en rellenos sanitarios y vertederos. Actualmente en el país operan 7 rellenos sanitarios y 7 vertederos.

Debido al interés de identificar los residuos que podrían estar llegando a ríos, playas y mares, según el Primer informe Situación de la NAMA Residuos, cerca de 360 620 toneladas anuales no son recolectadas. Concentrándose esta situación en los municipios con mayor cantidad de territorio rural, que se caracterizan por tener los porcentajes más bajos de recolección debido a la dificultad de gestionar los residuos en territorios extensos, de difícil acceso y con menor población. Dadas las limitaciones de información, no se puede afirmar que todos los residuos no recolectados son fugas al ambiente, ya que algunos pueden estar siendo recuperados para el reciclaje o en el caso de los residuos orgánicos, aprovechados para alimentación de animales o compostaje en los hogares, como es costumbre en las zonas rurales del país.

Según la Encuesta Nacional de Hogares (ENAH), del Instituto Nacional de Estadística y Censos, desde el 2010 se mantiene la tendencia de que la mayoría de las familias entregan sus residuos a camiones recolectores y usan como segunda opción la quema o el enterramiento de los residuos y el vertido a un río, quebrada o mar, siendo este un hábito poco utilizado (0,07%) [13].

Por otra parte, una fracción de los residuos sólidos son separados en la fuente de origen, en las calles o en los vertederos para ser valorizados mediante procesos de reciclaje. Según el Ministerio de Salud, en 2019 se recuperaron 90 707 toneladas anuales (6,75%), de las cuales 39 827 toneladas fueron recicladas (2,96%) y 203 toneladas (0,02%) enviadas a co-procesamiento en las empresas cementeras.

No obstante, según información de 22 industrias que transforman residuos (cartón, vidrio, metales, plásticos (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS) en el 2019 se reciclaron 203 879 toneladas, que en el caso del cartón y el vidrio incluye la importación de residuos de países de la región Centroamericana y Caribe. También, varios flujos de residuos (tetrapack, PET, chatarra, aluminio, cobre y papel) se acopian y exportan a diversos destinos para su transformación. Según datos de la Dirección General de Aduanas del Ministerio de Hacienda, en el 2019 se exportaron 247 283 toneladas. Esta diferencia en los datos, que reporta el Ministerio de Salud y otras instancias gubernamentales, es un reflejo de la problemática de la metodología de recopilación de información.

Los principales factores financieros, institucionales y socioculturales que limitan el incremento de la recuperación y el reciclaje son: precios bajos de los materiales por lo que no cubren los costos de operación ni la inversión, un mercado nacional limitado, costos directos altos, costo del transporte desde zonas alejadas, dificultad de acceso a crédito, costos altos de los procesos de formalización y el exceso de requisitos, procesos complejos y lentos, falta de incentivos a la actividad, falta de estímulo a la compra de productos reciclados en el país, las limitaciones en la recolección selectiva municipal y la mala separación de materiales reciclables, especialmente el plástico.

La aplicación del principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), está normado con el Decreto N 38272-S: Reglamento para la Declaratoria de Residuos de Manejo Especial, que regula 14 tipos de residuos: llantas usadas, baterías ácido plomo, pilas de reloj y otras pilas, aires acondicionados, refrigeradoras, transporte de frío y equipos de refrigeración industrial, aceite lubricante usado, envases plásticos para contener aceites lubricantes, envases metálicos, plástico y vidrio para contener agroquímicos, artefactos eléctricos y electrónicos, fluorescentes y bombillos compactos, refrigerantes, colchones, poliestireno y vehículos automotores y equipo especial. No se incluyen aún otros envases ni embalajes. Actualmente están registradas ante el Ministerio de Salud 351 unidades de cumplimiento (organizaciones de productores responsables) que se dedican al manejo de estos residuos. Con respecto a los envases de agroquímicos aún no existe una unidad de cumplimiento conformada por los fabricantes o los importadores del producto, pero la Fundación Limpiemos Nuestros Campos (FLNC) anualmente recupera entre 250 a 350 toneladas de envases vacíos de insumos agropecuarios.

Otras empresas privadas del sector industrial y comercial, a las que no se les aplica la REP han implementado medidas para reducir o prevenir la generación de residuos. Entre estas están: empaque de productos a mayor volumen, para eliminar paquetes y residuos, sistema de rellenado de envases, recuperación de empaques post consumo (plásticos, tetra pak, aluminio y hojalata) para su reciclaje, reducción del plástico que coloca en el mercado mediante el aligeramiento de sus envases, la utilización de resina de PET reciclada o el uso de envases de materiales alternativos como aluminio y vidrio retornable, recepción y disposición final de medicamentos no utilizables y acciones internas para el fomento del reciclaje entre el personal, entre otros. Así mismo, varias empresas están trabajando en nuevas medidas para implementar en el corto plazo, tales como el aumento de la renovabilidad y reciclabilidad de los envases, cambiar algunos productos comercializados por otros menos contaminantes, identificar nuevas alternativas de empaque para reducirlos y/o sustituirlos, aumento de las metas de recuperación post consumo de envases de productos puestos en el mercado.

Entre las iniciativas más importantes para la prevención en la generación de residuos, está la aprobación e implementación de la Estrategia Nacional de Sustitución de Plástico de un solo uso por alternativas renovables y compostables 2017-2021, coordinado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y el Ministerio de Salud, que ha impulsado la sensibilización del comercio, de empresas de comidas, la realización de estudios de impacto del cambio en lo económico, social y ambiental, la oferta de fibras naturales en el país, aplicación de incentivos en municipios, proyectos de ley para la eliminación y la comercialización de productos de plástico de un solo uso, los fabricados con poliestireno expandido (conocido como estereofón) y los que incluyan microperlas o microplásticos y la prohibición para que las instituciones públicas adquieran este tipo de productos.

En el país se realizan actividades de limpieza en espacios públicos que incluyen playas, ríos, zonas urbanas, calles, sitios públicos, áreas subacuáticas, entre otros. Estas son impulsadas por las municipalidades, organizaciones, empresas, población civil y otras instituciones.

Las municipalidades plantean que los sitios críticos de acumulación de residuos son principalmente lotes baldíos, puentes, cafetales, aceras, quebradas, cunetas, calles y algunos parques. La manera de identificar estos botaderos ilegales varía según el cantón, pero indican que las denuncias ciudadanas y los asentamientos informales son los más usuales. En el centro de las ciudades se efectúa, además de la recolección de residuos, la limpieza de las vías, sin embargo, esto no evita el arrastre al alcantarillado pluvial. Es un reto estimar la cantidad de residuos mal dispuestos en los cantones y, por ende, conocer la cantidad de éstos que podrían estar llegando a los océanos por esta fuente. Las municipalidades registran las cantidades de

residuos (o al menos el costo de disponerlos) que recogen en sus programas de eliminación de botaderos ilegales y en las campañas de limpieza de playas y de ríos, lo que representa el único método existente para cuantificar estos residuos mal dispuestos.

Con respecto a la gestión de residuos en las cuencas, existen varias iniciativas que tienen mayor o menor alcance según el empeño y coordinación de las subcomisiones, por ejemplo, la Comisión Interinstitucional de Proyecto Corredores Biológicos Interurbanos y Comisión Tárcoles y la Estrategia Nacional Ríos Limpios para la rehabilitación y recuperación de cuencas urbanas, que tienen un eje de trabajo específicamente de gestión de residuos sólidos.

Diversas organizaciones realizan campañas de limpieza de ríos y playas, por su cuenta o en coordinación con municipalidades, empresas u otros. Los criterios utilizados para elegir los sitios de las campañas son: sitios de alta visitación turística nacional e internacional, accesibilidad a las zonas de limpieza, playas inscritas en el Programa Bandera Azul Ecológica (PBAE), zonas de acumulación de residuos, entre otros.

Las organizaciones poseen diversos métodos para organizar y realizar las actividades. Algunas tienen la práctica de llevar un control de la cantidad de residuos recolectados en cada actividad y las fracciones en que se separan. En algunos casos identifican marcas de los productos y también se reporta la recolección de artes de pesca. La mayoría de ellas pesa los residuos y lleva registro de la cantidad de voluntarios. Sin embargo, no existe una base de datos nacional que permita cuantificar lo recolectado en dichas actividades. Al respecto el PBAE categoría playas definió una metodología para la toma de muestras, no obstante, los resultados no han sido aún sistematizados.

Las posibilidades de transformación en nuevos productos, de los residuos recolectados en estas actividades de limpieza, es un reto ya que depende del estado de los materiales y las posibilidades de traslado. Usualmente, los residuos se envían a algún relleno sanitario en coordinación con la municipalidad.

Fuentes marinas

Según la revisión bibliográfica se puede resumir que, en Costa Rica se tienen dos fuentes principales de contaminación por residuos sólidos en el mar. La primera es el sector pesquero y la segunda el transporte marítimo. No se considera la contaminación proveniente de corrientes marinas, debido a que el impacto de los residuos existentes en las aguas oceánicas, no se puede determinar. Así como una contribución por los servicios turísticos en el océano.

En el sector pesquero, existe evidencia que se pueden generar, residuos como artes de pesca abandonadas en el mar, ya sea accidental o intencionalmente, las cuales producen impactos negativos directos sobre la economía al disminuir los productos comercializables, representan una amenaza para los pescadores, afectan los hábitats marinos y sus especies [1]. Se han evidenciado zonas de acumulación de residuos como la Isla del Coco [6] y especies marinas lesionadas o atrapados por ellos [2], [3], [4], [5]. Durante esta investigación se identificó, además, que el sector pesquero artesanal genera residuos ordinarios (como envases plásticos), artes de pesca (redes, cuerdas, líneas, anzuelos, nasas y boyas) y residuos de aceites y sus envases, así como baterías para el motor de las embarcaciones y la iluminación durante actividades de pesca nocturna. Semanalmente las cuerdas y los anzuelos son las artes que más se pierden debido a que estos quedan atrapadas en el medio, mientras que las boyas tienen una vida útil mayor, pero en ocasiones, se las roban. La gestión de los residuos de las artes de pesca es variada, en el caso de las redes, estas se intentan reparar o de reusar en cercas para gallinas o pollos. En general, muchos pescadores envuelven las artes de pesca en los residuos ordinarios con el fin de que no sean detectables y se los lleven los camiones recolectores del gobierno

local, en otras ocasiones, son acumulados en sus hogares. Lamentablemente, en la mayoría de las ocasiones no tienen formas de disponerlos adecuadamente y existen pocas organizaciones o empresas que reciban este tipo de materiales para su transformación.

Por otro lado, los residuos que generan las embarcaciones que brindan servicios turísticos son en su mayoría residuos ordinarios (como envases de comida, refrescos y empaques), los cuales usualmente son gestionados por ellos mismos, junto con los residuos ordinarios de sus hogares que son recolectados por los gobiernos locales. Recalcan que sus operaciones están muy ligadas al bienestar del ecosistema y se ven afectados por la presencia de residuos y sus impactos.

En el país se identificaron seis puertos, cinco muelles y tres marinas en las costas Pacífico y Caribe, las cuales son administradas o fiscalizadas por instituciones públicas y otras de manera privada. La prestación de servicios para la gestión de residuos en los puertos se debe tramitar previamente por parte de los agentes navieros con una agencia portuaria [14], [15], la cual se pone en contacto con un gestor de residuos autorizado por el Ministerio de Salud y en el caso de los puertos o muelles administrados por el Instituto Costarricense de Puertos del Pacífico (INCOP), estos deben estar autorizados por ellos también [16], [17]. INCOP realiza el cobro por la gestión de los residuos por tonelada para líquidos y sólidos. Entre los puertos de Caldera, Puntarenas y Golfito se recolectaron un total de 13 679 toneladas de residuos entre el 2016 y el 2020 [18]. En el caso del Caribe, se desconocen las cantidades y los costos de los servicios.

Los residuos recolectados no tienen un adecuado registro y seguimiento. Principalmente recolectan “sludge” o aceite quemado y residuos sólidos (plástico, vidrio, madera, cartón, papel, aluminio), los cuales son llevados a centros de recuperación, a la empresa CEMEX donde son coprocesados y a rellenos sanitarios. Estas empresas gestoras enfrentan dificultades con los trámites necesarios para su registro, ya que, éstos dependen de la administración correspondiente y existen grandes limitaciones para la aplicación de sanciones cuando los navíos incumplen la disposición de los residuos. Las denuncias por actos ilícitos en el mar y en los puertos se gestionan de manera distinta mediante procesos poco eficientes. Además, se indicó que el contacto con los agentes navieros se les dificulta ya que debe ser a través de las agencias portuarias.

Impacto a ecosistemas

Costa Rica posee una amplia diversidad de ecosistemas marinos, distribuidos en zonas estuarinas y costeras hasta zonas pelágicas y de elevada profundidad [19]. Lamentablemente, al igual que muchos otros ecosistemas marinos en el mundo, estos reciben una importante cantidad, aún no cuantificable de residuos sólidos, especialmente plásticos [1], [20], [21]. Las zonas costeras y estuarinas presentan una marcada afectación de gran variedad de especies de vertebrados e invertebrados marinos, especialmente en sus primeras etapas de vida [22], [23], [24]. Estos ecosistemas tienden a ser sumideros de residuos sólidos debido al efecto de los ríos y las mareas [25], [26]. Lo anterior, puede llegar a tener consecuencias en los organismos que las habitan, y afectar a las poblaciones humanas que depende económicamente de ellos, como lo son las especies de interés comercial, como pargos (peces), jaibas (crustáceos), pianguas (bivalvos), entre otros [27], [28], [29].

La ingesta de residuos sólidos representa un problema directo en la biota presente en estos ecosistemas, disminuyendo las abundancias y la salud de las poblaciones afectadas [30]. A escala mundial se realizan esfuerzos para dimensionar la realidad de la problemática con los residuos sólidos marinos con la finalidad de mejorar el estado de conocimiento del tema [31]. Sin embargo, en Costa Rica esta información es deficiente y poco articulada entre los mismos sectores encargados en la fiscalización de la temática.

Investigaciones a nivel global identifican a la actividad pesquera como una importante fuente de residuos sólidos, afectando entre otros, sistemas arrecifales debido a los generados por sus implementos de pesca o extravío de estos, modificando perjudicialmente a los ecosistemas que los presentan [32], [20], [33]. Asimismo, esta problemática incluye a su vez ambientes pelágicos, donde se han identificado acumulación de residuos por efectos de la dinámica de corrientes marinas y efecto de los vientos [34]. Gibbs et al. [35] indican que muchos de los componentes de estas grandes acumulaciones de residuos en mar abierto son residuos del sector pesquero, que a su vez representan una amenaza para la vida marina.

Los aportes fluviales corresponden a una de las principales fuentes de residuos sólidos en los ecosistemas marinos. Costa Rica posee un importante y diverso recurso hídrico, que debido al desarrollo industrial y urbanístico se ha deteriorado aceleradamente en especial en la Gran Área Metropolitana, en donde una parte de los residuos ordinarios son mal gestionados y terminan en las cuencas e inevitablemente en el mar. Existen iniciativas de algunas instituciones públicas y privadas, para capturar información sobre la contaminación marina, pero esta información no está accesible. La evaluación de los efectos del impacto de estos residuos es una necesidad a nivel global y país, con esta información se pueden desarrollar estrategias de mitigación dirigidas y eficaces [26], [36].

Monitoreo

Costa Rica ha elaborado un sistema de monitoreo para sus áreas protegidas enfocada a diferentes ecosistemas con información georreferenciada, sistematizada y con criterios técnicos-científicos que sean cotejables en el tiempo. Mediante el Decreto Ejecutivo No. 39747-SINAC, en el 2016, el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), inició el Programa Nacional de Monitoreo Ecológico (PRONAMEC). Este tiene como objetivo evaluar el estado de salud ecológica de los objetos de estudio, identificando presiones y amenazas a los recursos evaluados. Estos PRONAMEC oficializados a nivel nacional, correspondientes a ecosistemas marinos son: playas rocosas, playas arenosas, manglares, arrecifes coralinos, arrecifes rocosos o bien es dirigido a conocer la salud de las poblaciones como cetáceos, tortugas marinas y peces pelágicos, además de cambio climático.

Cada uno de estos PRONAMEC integra un grupo de indicadores específicos para los respectivos ecosistemas, estableciendo rangos de variación mediante criterios científicos que permitan la fiscalización de posibles amenazas. De los protocolos actualmente oficializados, sólo el correspondiente a playas arenosas, contempla un indicador para residuos sólidos, el cual considera la recolección, la clasificación y la cuantificación de todos los residuos sólidos identificados en un área determinada, utilizando cinco categorías (vidrios, metales, plásticos, materiales celulósicos y otros) (SINAC, 2016). No obstante, la información recopilada mediante la aplicación de este protocolo aún no se ha reportado de manera oficial, desconociéndose cuántas Áreas Marinas Protegidas (AMPs) lo han aplicado y por cuánto tiempo.

Este indicador dimensiona la posibilidad de contar con una herramienta con rigurosidad científica en cada uno de los protocolos existentes, para cuantificar el estado de los residuos sólidos en los diversos ecosistemas presentes en el país. La depuración y estandarización de este tipo de indicador generaría información sobre el estado de contaminación de los diversos ecosistemas, los cuales podrían ser comparados a su vez entre sí (propuesta de indicador a cada PRONAMEC en: Anexo 1). Adicionalmente, en la “Estrategia nacional para sustituir el consumo de plásticos de un solo uso por alternativas renovables y compostables 2017-2021” de Costa Rica, se describe una propuesta metodológica para el monitoreo cuali-cuantitativo de microplásticos en arena de playa. Sin embargo, ninguno de estos dos métodos ha expuesto resultados a nivel nacional.

Existen otras iniciativas nacionales, que corresponden a compromisos internacionales adquiridos, para la sistematización de datos: como en el marco del MARPOL, al cual Costa Rica no se ha adherido aún, el cual busca la sistematización de la información sobre los residuos generados en puertos, muelles y marinas, con el objetivo de mejorar la gestión de éstos en esta temática. Así como: el Proyecto Asociaciones GloLitter, implementado conjuntamente por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Marítima Internacional (OMI), financiado por la Agencia Noruega para la Cooperación al Desarrollo (NORAD) y asumida por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Obras Públicas y Transportes y Ministerio de Seguridad Pública, del cual también contribuye el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPESCA), el cual tiene como objetivo general: “Iniciar un proceso para ayudar al país a prevenir y reducir la basura plástica marina de los sectores del transporte marítimo y la pesca, e identificar oportunidades para la reducción del uso de plástico en ambas industrias”. La finalidad de este es cuantificar los residuos sólidos en el mar, que ayuden a plantear opciones de mitigación al problema.

Normativa

Normativa internacional

Existen regulaciones ambientales a nivel internacional que influyen en cómo abordar el problema de los residuos marinos. Se cuenta con convenios, protocolos y acuerdos globales y regionales que se trasponen a instrumentos normativos a nivel regional y nacional respectivamente. En la Figura 1 se pueden observar diferentes instrumentos normativos internacionales vinculantes en la gestión de residuos marinos, a muchos de ellos Costa Rica ha confirmado con su adhesión.

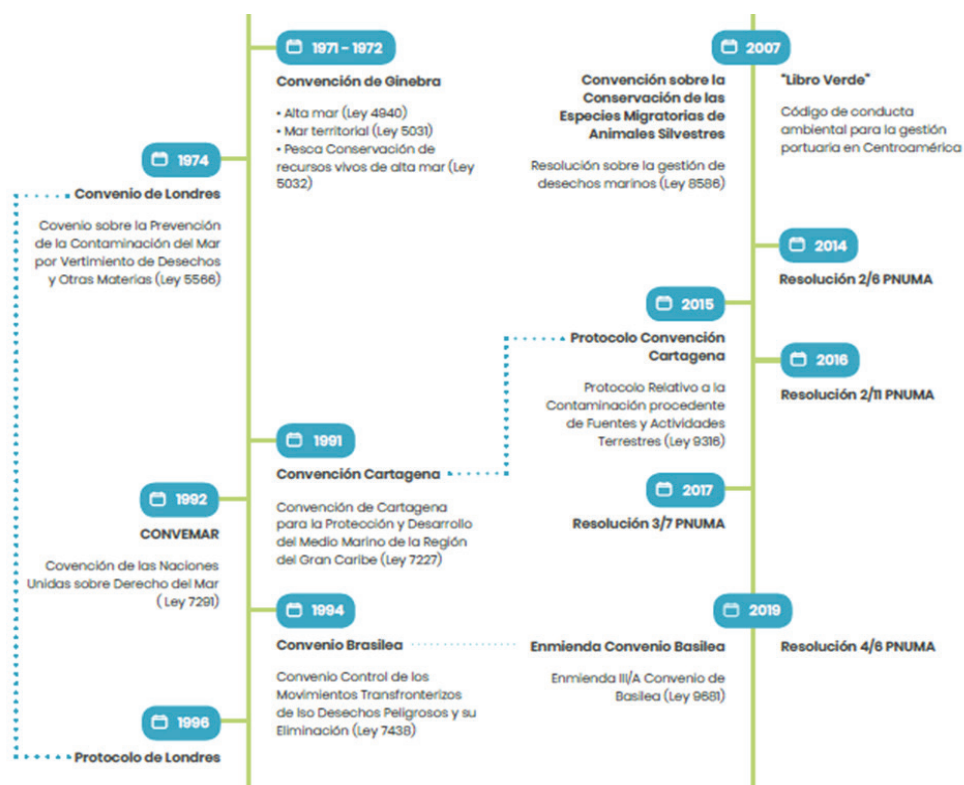


Figura 1. Instrumentos normativos internacionales vinculantes a la gestión de residuos marinos. (Datos tomados de: Ministerio de Salud. Plan Nacional de residuos marinos 2021-2030)

Nota 1: Aquellos que mencionan una ley entre paréntesis, corresponden a los que Costa Rica ha aprobado su adhesión. Nota 2: El año indicado en la figura es el año correspondiente a la promulgación de la ley nacional relacionada con la aprobación de la adhesión del país, para aquellos que no aplique la adhesión (por ejemplo, resoluciones de PNUMA) el año mostrado corresponde a su creación.

Adicionalmente existe el “Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques” (MARPOL 73/78), el cual aborda la prevención y reducción de la contaminación del medio marino por los buques. En este se mencionan las distancias desde la tierra y la forma en que se pueden verter algunos residuos. Se indica la prohibición del vertimiento en el medio marino de toda clase de plásticos. Además, establece que los Gobiernos se deben comprometer a garantizar que en los puertos y terminales existan instalaciones y servicios de recepción de residuos con capacidad adecuada. Costa Rica no ha ratificado este convenio.

Normativa nacional

En Costa Rica se han desarrollado en los últimos años una variedad y cantidad de normativa y herramientas de planificación que guían el proceso de la gestión integral de residuos, muchas de ellas en estrecha relación y directamente vinculante con el problema de los residuos marinos. En la *figura 2* se muestran los principales instrumentos normativos.



Figura 2. Instrumentos normativos nacionales vinculantes a la gestión de residuos marinos. (Datos tomados de: Ministerio de Salud. Plan Nacional de residuos marinos 2021-2030)

Nota: La fecha indicada corresponde al año de entrada en vigencia o creación del instrumento normativo.

Adicionalmente, hay gran cantidad de reglamentos relacionados a la temática. De manera general se pueden mencionar:

- Reglamento sobre el manejo de residuos sólidos ordinarios (Decreto 36093-S).
- Reglamento General de la Ley para la Gestión Integral de Residuos (Decreto 37567-S-MI)
- Reglamento para la declaratoria de residuos de manejo especial (Decreto 38272-S).
- Reglamento sobre Llantas de Desecho (Decreto 33745-S).
- Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos (Decreto 35933-S).

Educación, sensibilización e información

Respecto a la educación formal, el Ministerio de Educación Pública (MEP) ejecuta desde el 2009 el programa de Educación Marina, no obstante, tanto ese programa como el de Gestión Integral de Residuos, se encuentran en proceso de actualización, elaboración de recursos didácticos y metodológicos que los acompañen. El Instituto Nacional de Aprendizaje (INA) tiene un módulo relacionado con la gestión de los residuos en los puertos, muelles y marinas, con una baja demanda. Por otra parte, el SINAC realiza algunas acciones en las áreas de conservación con territorio marino.

En cuanto a las acciones de capacitación, sensibilización e información, en el tema de residuos sólidos y marinos estas son impulsadas tanto por instituciones públicas como sector privado y ONGs.

En el país se impulsan diversas iniciativas tales como la marca país Esencial Costa Rica, el PBAE, la Certificación de Sostenibilidad Turística (CST) del Instituto Costarricense de Turismo (ICT) y recientemente la prohibición de plásticos de un uso en las Áreas Silvestres Protegidas (ASP).

Se reportan también, campañas nacionales que tienen como objetivo cambiar hábitos y costumbres en el manejo de los residuos sólidos entre ellas: Tan fácil como, Chao Plástico Desechable, Campaña contra el plástico: Reutilizando el plástico, Limpiathon, ¡¿Diay Jacinto?!, Sinbolsasporfavor, Proyecto ECOBOT y Ecoins, Ambientados, #yomecomprometo de la Estrategia Nacional de sustitución de plástico de un solo uso, y “*Separa y Vencerás*”.

Investigación, desarrollo, innovación

La investigación en temas de residuos marinos es incipiente y se desarrolla principalmente en las instituciones de educación superior. Se han investigado microplásticos en invertebrados acuáticos, en playas en el Pacífico y en el litoral Atlántico, así como en especies marinas del Parque Nacional Marino Las Baulas. 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. Además, se desarrolla actualmente el proyecto Glolitter apoyado por NORAD, OMI y FAO que apoya a los países en desarrollo, 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 y el proyecto Promar por el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación Natural y Seguridad Nuclear, que tiene como objetivo reducir la cantidad de plásticos que llegan al Mar Caribe desde fuentes terrestres, promoviendo a nivel regional soluciones integradas enfocadas en las fuentes en República Dominicana, Costa Rica y Colombia.

En la actualidad, aunque se han creado algunas normas nacionales para el etiquetado y la certificación de productos, no existen laboratorios que puedan realizar pruebas de: composición de plásticos, plásticos biodegradables, compostables, compostables en ambiente marino, biodegradabilidad y renovabilidad de otros materiales. Tampoco identifican alianzas estratégicas con ONGs, sector privado, gobiernos locales, academia y otros actores de la sociedad civil, que permitan la innovación, así como que la presencia de muchas barreras de carácter institucional, financiero, tecnológico, sociocultural y legal que permitan el fortalecimiento de empresas procesando materiales o nuevas que transformen y desarrollen nuevos productos.

Conclusiones y recomendaciones

1. Costa Rica ha avanzado en la gestión integral de residuos sólidos, pero se requiere el fortalecimiento por medio de la incorporación de componentes de planificación y herramientas dirigidas a prevenir los residuos marinos, así como mejorar la limpieza de los espacios públicos.
2. La implementación de estrategias de Responsabilidad Extendida del Productor, de Responsabilidad Compartida y de Economía Circular, permiten la prevención y reducción de la contaminación marina por residuos sólidos. El país debe apoyar los esfuerzos para el diseño y ejecución de sistemas o modalidades voluntarias para residuos clave.
3. El país carece de protocolos y metodologías de gestión para la prevención, recolección y separación que conlleven a la sistematización y análisis de datos para la toma de decisiones, por lo que se deben desarrollar sistemas que lo permitan.
4. La cantidad de residuos marinos producidos por el transporte marítimo, el sector pesquero, las actividades acuáticas y el turismo es aún desconocido. Se deben realizar estudios para determinar el aporte de esas fuentes a la contaminación en ambos mares, así como los principales problemas y limitaciones que enfrenta cada sector, con el fin de trazar rutas de acción que promuevan la prevención y mitigación de los residuos producidos por fuentes marinas.
5. El estado de la infraestructura y equipo para la gestión de residuos presente en los puertos, muelles y marinas es desconocido por lo que se debe determinar la situación actual sobre la prestación de servicios de gestión de residuos en ellos, así como diseñar y construir la infraestructura adecuada y la aplicación de una estrategia del manejo técnico, administrativo y financiero de los residuos en el sitio y su coordinación con los gestores autorizados.
6. Existen programas formales educativos enfocados en el tema de residuos marinos, pero estos deben de ser actualizados e implementados por parte del Ministerio de Educación Pública (MEP).
7. Diversas instituciones y organizaciones han realizado campañas de información intersectoriales y han implementado acciones que fomentan la educación no formal para el cambio de hábitos en la gestión de residuos terrestres y marinos. Se debe continuar con el fortalecimiento de la educación no formal mediante la coordinación de acciones intersectoriales y campañas de información.
8. Costa Rica ha dado la adhesión a diversos Convenios y Protocolos Internacionales que fomentan la gestión integral de los residuos marinos, pero debe elaborar instrumentos técnicos, normativos y leyes que permitan lograr la adopción de esa normativa internacional.

9. En el país existe gran cantidad de normativa relacionada a la gestión de residuos sólidos, que si bien, está estrechamente relacionada e incluye a los residuos marinos, no mencionan de forma clara y expresa a estos. Además, la normativa no cita explícitamente los residuos generados por el sector pesquero y de navíos mercantes, tanqueros, turísticos y de pasajeros, nacionales ni extranjeros.
10. La investigación sobre residuos marinos es incipiente por lo que se debe desarrollar una línea fuerte en esta área y su socialización mediante programas de extensión que reduzcan los residuos marinos y sus impactos negativos al ambiente.
11. Empresas transformadoras de residuos han realizado esfuerzos para dar valor a éstos, por lo que se recomienda eliminar las barreras que enfrentan para la innovación mediante un entorno externo que favorece la empresariedad.
12. El país posee una mala gestión de la información sobre la incidencia de residuos sólidos por lo que esta se debe gestionar con mecanismos de vigilancia en los ecosistemas marino-costeros.
13. El país no cuenta con un sistema estandarizado y cotejable en el tiempo sobre la incidencia de residuos sólidos en los ecosistemas marino-costeros, por lo que una base de datos sólida y sistematizada permitiría un mejor sistema de control y de información para todo público.
14. En la actualidad, aunque se han creado algunas normas nacionales para el etiquetado y la certificación de productos, no existen laboratorios que puedan realizar pruebas de: composición de plásticos, plásticos biodegradables, compostables, compostables en ambiente marino, biodegradabilidad y renovabilidad de otros materiales.
15. El sector privado, las ONGs, la comunidad científica, los países amigos y las agencias de cooperación han brindado mucho apoyo a las municipalidades y al gobierno central en los esfuerzos de prevención y gestión integral de residuos sólidos.
16. Para lograr el desarrollo de todas las acciones estratégicas del Plan se necesitan a todos los sectores involucrados participando desde los aspectos que les corresponde. El sector privado y las ONGs son esenciales en la asistencia a las municipalidades para el impulso de programas y proyectos. Las agencias de cooperación y países amigos apoyan mediante mecanismos de cooperación técnica y/o financiera donde se den intercambios de experiencias Norte-Sur, Sur-Sur, de tal manera, que se logre un plan eficiente en la gestión de los residuos marinos.
17. La comunidad científica internacional podría proporcionar información y tecnologías sobre aspectos relevantes que serán de gran utilidad para establecer las mejores estrategias para prevenir y gestionar los residuos marinos.

Agradecimientos

Este proyecto se lleva a cabo bajo el marco del Tratado de Libre Comercio entre Estados Unidos, Centroamérica y República Dominicana (DR CAFTA), apoyado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y su asociado Battelle. Tuvo, además, el apoyo del Punto focal del DR CAFTA, representado por la Directora de la Dirección de Cambio Climático, Patricia Campos Mesén.

La construcción de este plan fue supervisada y validada por el Comité Interministerial, conformado por el Gabriel Rodríguez Castillo del Viceministerio de Agua y Mares, MINAE, Olgan Mora Navarro, Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, MINAE y Olga Segura Cárdenas del Ministerio de Salud.

Referencias

- [1] FAO. (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) (2016). Abandoned, lost and discarded gill-nets and trammel nets. E. Gilman et al (ed.). Roma, Italy
- [2] Céspedes-Jiménez, J. (2021) Pescador. Comunicación personal. Conversando sobre impacto ambiental y en el sector pesquero producto de los residuos marinos» Cabuya, Puntarenas, Costa Rica
- [3] Rodríguez-Ugalde, J. (2021) «Pescador. Comunicación personal. Conversando sobre el impacto ambiental y en el sector pesquero producto de los residuos marinos». Mal País, Puntarenas, Costa Rica
- [4] Salazar-Rodríguez, E. (2021) «Pesca turística. Comunicación personal. Conversando sobre el impacto ambiental y en el sector pesquero producto de los residuos marinos.» Cabuya, Puntarenas, Costa Rica
- [5] Sanchez-Segura, E. (2021). «Pescador. Comunicación personal. Conversando sobre impacto ambiental y en el sector turismo producto de los residuos marinos». Cóbano, Puntarenas, Costa Rica
- [6] Montero-Cordero, A. (2018). Plástico en el mar ¿tiramós nuestro esfuerzo por la borda? En Revista de Biología Tropical. <https://doi.org/10.15517/RBT.V011.34794>
- [7] UN (United Nations). (2007). Resolution adopted by the General Assembly on 22 December 2007: Sixty-second session (Agenda, item 77 (a), pp. 22-37). UN. <https://doi.org/10.1017/s0251107x00020617>
- [8] UNEP/OSPAR. (2009). Marine Litter: A Global Challenge. Nairobi. <https://stg-wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/31632/MLAGC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] GESAMP. (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment 2nd phase. Reports and Studies GESAMP, 90, 96. ISSN: 1020-4873%5Cnhttp://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/GESAMP_microplastics_full_study.pdf
- [10] Corbin, C., Wedemier-Graham, S., & Franc, E. (2014). Regional Action Plan on Marine Litter Management (RAPMaLi) for the Wider Caribbean Region.
- [11] UNEP, & GRID-Arendal. (2016). Marine Litter Vital Graphics. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal. Nairobi and Arendal. www.unep.org , www.grida.no
- [12] Ministerio de Salud (2019). Documento entregado por Olga Segura Cárdenas, durante la búsqueda de información sobre residuos sólidos en Costa Rica
- [13] Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2019). ENAHO. Total de viviendas por sistema de eliminación de basura según zona y región, 2010-2019. https://www.inec.cr/medio-ambiente/practicas-mediambientales-en-los-hogares?keys=Encuesta+nacional+de+hogares+&shs_term_node_tid_depth=All&field_periодо_tid=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=2011
- [14] Salas Monge, A. (2021) «Comunicación personal. Conversando sobre procedimiento para recibo de residuos provenientes de Empresas Navieras a su arribo a puertos.» Director Ejecutivo en la Cámara Costarricense de Navieros (NAVE).
- [15] Sotela-Vargas, F. (2021). «Comunicación personal. Conversando sobre procedimiento para recibo de residuos provenientes de Cruceros a su arribo a puertos». Director Ejecutivo de la Asociación Costarricense de la Industria de Cruceros (ACIC)
- [16] Jackson, B. y Jackson, V. (2021) «Comunicación personal». Serviport S.A.
- [17] Rodríguez-Herrera, J. (2021) «Comunicación personal». Sludge and Waste Reception Company S.A.
- [18] INCOP. (Instituto Costarricense de Puertos del Pacífico). (2021). Planificación Institucional.
- [19] Wehrtmann, I. S., & Cortés, J. (2009). Marine biodiversity of Costa Rica, Central America. 538. <https://doi.org/978-1-4020-8277-1>
- [20] Lively, J. A., & Good, T. P. (2019). Ghost Fishing. World Seas: An Environmental Evaluation Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts, 183-196. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00010-3>
- [21] Schuyler, Q., Hardesty, B. D., Wilcox, C., & Townsend, K. (2014). Global Analysis of Anthropogenic Debris Ingestion by Sea Turtles. Conservation Biology, 28(1), 129–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/cobi.12126>
- [22] Berkström, C., Eggertsen, L., Goodell, W., Cordeiro, C. A. M. M., Lucena, M. B., Gustafsson, R., Bandeira, S., Jiddawi, N., & Ferreira, C. E. L. (2020). Thresholds in seascape connectivity: the spatial arrangement of nursery habitats structure fish communities on nearby reefs. Ecography, 43(6), 882-896. <https://doi.org/10.1111/ecog.04868>
- [23] Glazner, R., Blennau, J., & Armitage, A. R. (2020). Mangroves alter predator-prey interactions by enhancing prey refuge value in a mangrove-marsh ecotone.

- [24] Marley, G., Deacon, A., Phillip, D., & Lawrence, A. (2019). Mangrove or mudflat: prioritising fish habitat for conservation in a turbid tropical estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 632, 13-25.
- [25] Ivar do Sul, J., Costa, M., Silva-Cavalcanti, J., & Araújo, M. (2014). Plastic debris retention and exportation by a mangrove forest patch. *Marine Pollution Bulletin*, 78(1), 252-257.
- [26] Luo, Y., Not, C., & Cannicci, S. (2021). Mangroves as unique but understudied traps for anthropogenic marine debris: A review of present information and the way forward. *Environmental Pollution*, 271, 116-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116291>
- [27] Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
- [28] Martin, C., Baalkhuyur, F., Valluzzi, L., Saderne, V., Cusack, M., Almahasheer, H., & Duarte, C. M. (2020). Exponential increase of plastic burial in mangrove sediments as a major plastic sink. *Science Advances*, 6(44). <https://doi.org/https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5593>
- [29] Rodrigues, S. M., Almeida, C. M. R., Silva, D., Cunha, J., Antunes, C., Freitas, V., & Ramos, S. (2019). Microplastic contamination in an urban estuary: Abundance and distribution of microplastics and fish larvae in the Douro estuary. *Science of the Total Environment*, 659, 1071-1081. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.273>
- [30] Setälä, O., Norkko, J., & Lehtiniemi, M. (2016). Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1), 95-101. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2015.11.053>
- [31] Jorgensen, B., Krasny, M., & Baztan, J. (2020). Volunteer beach cleanups: civic environmental stewardship combating global plastic pollution. *Sustainability Science* 2020 16:1, 16(1), 153-167. <https://doi.org/10.1007/S11625-020-00841-7>
- [32] de Carvalho-Souza, G. F., Llope, M., Tinôco, M. S., Medeiros, D. V., Maia-Nogueira, R., & Sampaio, C. L. S. (2018). Marine litter disrupts ecological processes in reef systems. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 464-471. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.05.049>
- [33] Valderrama Ballesteros, L., Matthews, J. L., & Hoeksema, B. W. (2018). Pollution and coral damage caused by derelict fishing gear on coral reefs around Koh Tao, Gulf of Thailand. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 1107-1116. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.08.033>
- [34] Franceschini, S., Mattei, F., D'Andrea, L., Di Nardi, A., Fiorentino, F., Garofalo, G., Scardi, M., Cataudella, S., & Russo, T. (2019). Rummaging through the bin: Modelling marine litter distribution using Artificial Neural Networks. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110580. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2019.110580>
- [35] Gibbs, S. E., Kent, C. P. S., Slat, B., Morales, D., Fouda, L., & Reisser, J. (2019). Cetacean sightings within the Great Pacific Garbage Patch. *Marine Biodiversity* 2019 49:4, 49(4), 2021-2027. <https://doi.org/10.1007/S12526-019-00952-0>
- [36] Yaney-Keller, A., Tomillo, P. S., Marshall, J. M., & Paladino, F. V. (2019). Using Unmanned Aerial Systems (UAS) to assay mangrove estuaries on the Pacific coast of Costa Rica. *PLOS ONE*, 14(6), e0217310. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0217310>

Coagulación de aguas residuales mediante una mezcla de polvo de *Crotalaria longirostrata* y sulfato de aluminio



Coagulation of wastewater using a mixture of *Crotalaria longirostrata* powder and aluminum sulfate

Alicia Pastrana-Pacho¹, Rudy Solís-Silvan², Israel Ávila-Lázaro³, José Ramón Laines-Canepa⁴, Baltazar Sánchez-Díaz⁵

Fecha de recepción: 18 de diciembre, 2021
Fecha de aprobación: 30 de marzo, 2022

Pastrana-Pacho, A; Solís-Silvan, R; Ávila-Lázaro, I; Laines-Canepa, J.R; Sánchez-Díaz, B. Coagulación de aguas residuales mediante una mezcla de polvo de *Crotalaria longirostrata* y sulfato de aluminio. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 135-142.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.6000>

- 1 Instituto Tecnológico Superior de Centla. México.
Correo electrónico: aliciapastrana10@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-8120-4341>
- 2 Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco. México.
Correo electrónico: Rudy.solisilvan@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-6373-0893>
- 3 Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.
Correo electrónico: rasrabond@gmail.com
- 4 Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.
Correo electrónico: josra_2001@yahoo.com.mx
- 5 Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco. México.
Correo electrónico: baltazar.sanchez@comalcalco.tecnm.mx

Palabras clave

Coagulante; floculación; turbiedad; color; prueba de jarras; agua residual.

Resumen

Los coagulantes naturales a base de plantas se han usado para el tratamiento de aguas desde tiempos remotos y son amigables con el medio ambiente. El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de remoción de turbiedad y color de una mezcla coagulante de polvo *Crotalaria longirostrata* y sulfato de aluminio vs sulfato de aluminio. Se evaluó la dosis óptima de sulfato de aluminio comercial y las mezclas coagulantes natural de polvo de *C. longirostrata* y sulfato de aluminio (tratamientos) que tuvieran la mayor remoción de turbiedad y color (variable respuesta) de un agua residual doméstica. Se utilizó un equipo de prueba de jarras marca Philes^{MR} para la determinación de las dosis óptimas de coagulantes. La turbiedad y color se midieron con un turbidímetro marca Lamote^{MR}. Se usó un diseño simple completamente aleatorizado de un factor y un análisis de varianza seguido de un contraste múltiple de Tukey para encontrar diferencias estadísticas significativas entre los diferentes tratamientos. Las mezclas de polvo de *C. longirostrata* con sulfato de aluminio (75 mg/L de polvo de *C. longirostrata* + 175 mg/L de sulfato) removieron una mayor cantidad de turbiedad y color que la dosis óptima de sulfato de aluminio (250 mg/L), con remociones de 83.4% de turbiedad y 64.9% de color respectivamente. Los resultados lograron reducir un 30% el uso del sulfato de aluminio. El uso de polvo *C. longirostrata* como coadyuvante en la remoción de turbiedad y color no tiene efectos tóxicos ya que es un arbusto comestible.

Keywords

Coagulant; flocculation; turbidity; color; jar test; residual water.

Abstract

Natural plant-based coagulants have been used for water treatment since ancient times, and they are friendly with the environment. The objective of this work was to evaluate the turbidity and color removal capacity of a coagulant mixture of *Crotalaria longirostrata* powder and aluminum sulfate vs aluminum sulfate. The optimal dose of commercial aluminum sulfate (treatments) and the natural coagulant mixtures of *C. longirostrata* powder and aluminum sulfate were evaluated, that had the highest turbidity and color (independent variable) removal of a domestic wastewater. A Philes^{MR} brand jar test kit was used to determine optimal coagulant dosages. Turbidity and color were measured with a Lamote brand turbidimeter^{MR}. A simple one-factor completely randomized design was used and an analysis of variance followed by a multiple Tukey test to find statistically significant differences between the different treatments. Mixtures of *C. longirostrata* powder with aluminum sulfate (75 mg / L of *C longirostrata* powder + 175 mg / L of sulfate) removed a greater amount of turbidity and color than the optimal dose of aluminum sulfate (250 mg/L) with removals of 83.4% of turbidity and 64.9% of color respectively. The results managed to reduce the use of aluminum sulfate by 30%. The use of *C. longirostrata* powder as an aid in the removal of turbidity and color does not have toxic effects since it is an edible shrub.

Introducción

Los coagulantes químicos son sustancias de origen natural o artificial que se adicionan al agua para remover la carga orgánica, inorgánica y biológica, mediante la formación de productos insolubles que tienden a precipitar, eliminándole olor, color y turbiedad. Desde los años 70 en varios países latinoamericanos están utilizando coagulantes naturales a bases de diferentes especies vegetales locales para disminuir en parte o en su totalidad el consumo de coagulantes químicos [1]. En el proceso de coagulación / floculación, algunos productos químicos se utilizan como coagulantes primarios y neutralizan las partículas coloidales cargadas. El coagulante reduce la fuerza de repulsión presente entre las partículas coloidales y, por lo tanto, las partículas entran en contacto entre sí y forman pequeños flocúlos. En la naturaleza están presentes varios coagulantes eficaces que pueden usarse directamente o después de la modificación [2]. Se ha estudiado que los altos niveles de aluminio remanente en las aguas tratadas ponen en riesgo la salud pública debido a que grandes cantidades pueden ser causante del síndrome del Alzheimer, así mismo menciona que investigaciones realizadas en Inglaterra muestran que el riesgo de contraer esta enfermedad es 1.5 veces mayor en los sitios donde las concentraciones de aluminio exceden los 0.110mg/l [3].

Los coagulantes de origen vegetal (PCB) se utilizan en el tratamiento de agua pero no son eficaces a escala industrial debido a su mayor costo en comparación con los coagulantes sintéticos[2]. Estos coagulantes son más efectivos en el tratamiento de aguas residuales, que tienen un rango de turbidez bajo o medio (50-500 NTU). Los bio-floculantes naturales o utilizados en el tratamiento de aguas residuales se aíslan de diversas fuentes naturales. Estos coagulantes se utilizan como coagulantes / floculantes primarios o auxiliares en el proceso de coagulación / floculación. Estos son económicos y también se utilizan como coagulantes / floculantes alternativos. La mejora de muchos parámetros en las aguas residuales tratadas es la función principal de los coagulantes-biocoagulantes o coagulantes naturales son ciertamente seguros, amigables con el ambiente y libres de toxicidad (bajo condiciones adecuadas de uso). Sus compuestos bioactivos son proteínas, polisacáridos, mucílagos, taninos y alcaloides [4]. En la actualidad se buscan mezclas de ambos tipos (sintéticos y naturales), entre los coagulantes naturales que se han utilizado se tiene referencias de *Moringa oleifera* y *Benincasa hispida* [5], *Mangifera indica* L [6], *Moringa Oleifera* -*Cactus Opuntia*- mezcla de alumbre [7], efluente del molido para la obtención del aceite de palma con el *Aloe Vera* [8] *Tamarindo* (*Tamarindus Indica*) [9].

A pesar de los avances de los polímeros naturales, las plantas de tratamientos siguen utilizando polímeros sintéticos a pesar de las consecuencias a la salud y contaminación los ecosistemas. El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la capacidad de remoción de turbiedad y color en aguas residuales mediante la aplicación de una mezcla de polvo de *Crotalaria longirostrata* (Chipilin) y sulfato de aluminio, para el tratamiento de aguas residuales. En base a los resultados obtenidos se pueden realizar propuestas para ser utilizado en las plantas de tratamientos de aguas residuales municipales buscando disminuir la dosis de sulfato de aluminio.

Materiales y métodos

Caracterización del Agua Residual

La muestra de agua residual a utilizar se tomó del biodigestor principal del Instituto Tecnológico Superior de Centla, en donde se recolectó un volumen de 100 litros siendo depositados en contenedores de 200 litros cada uno. El análisis de las aguas se realizó en el laboratorio del Instituto Tecnológico superior de Comalcalco, donde se midieron los parámetros fisicoquímicos

de turbiedad y color. Con el uso de un turbidímetro marca Hanna HI 93703 con precisión 0.01 NTU-turbiedad por el método EPA 180.1 (EPA 1983, NOM-041-SSA1 1993, ISO 1990) se midió la turbiedad. El color fue medido con el mismo equipo con una precisión 0.1 CU-color por el método estándar 2120B. Los parámetros iniciales del agua cruda residual fueron de: turbiedad de 167.7 NTU y color 657 U.C

Obtención del Sustrato de *C. Longirostrata*

El *C. Longirostrata* se obtuvo 1 kg de hojas frescas, mismas que fueron colocadas en charolas de aluminio para ser secadas a temperatura ambiente en un tiempo aproximado de 2 semanas, siguiendo la metodología propuesta por [10]. Siendo trituradas por un mortero y posteriormente tamizadas en malla de plástico para dejar homogénea el tamaño de las partículas, se enfrascó en botellas de plástico de tereftalato de polietileno (acrónimo en inglés, PET). En la figura 1 se presenta la fotografía del polvo del *C. longirostrata* obtenido por microscopía de barrido.

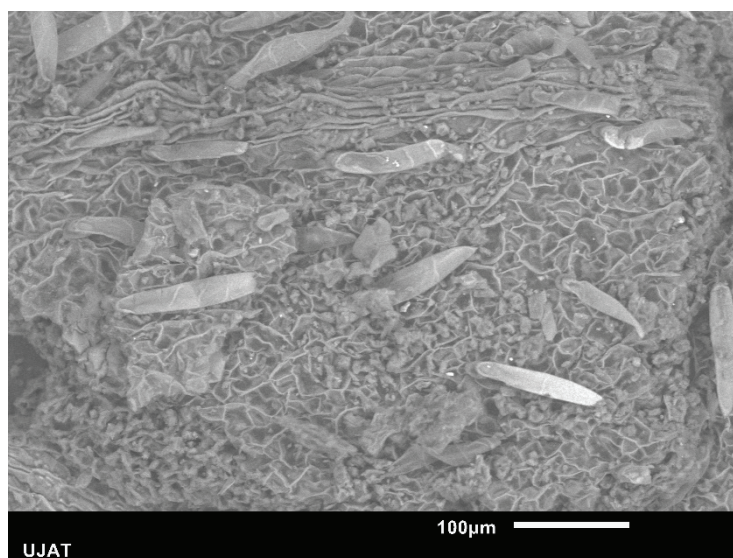


Figura 1. Corpúsculos de *C. longirostrata* obtenida en microscopio de barrido.

Se prepararon dos soluciones de referencia. Para la solución del sulfato de aluminio se pesaron 2 g de sulfato de aluminio (J.T. Baker, Nueva Jersey, EUA) con un grado de pureza del 98.5 % y se disolvieron en un litro de agua destilada. De la misma forma, se preparó la solución de referencia del polvo de la *C. longirostrata*, pesando 2 g y disolviendo en un litro de agua destilada [11]

Procedimientos de Coagulación-Floculación

Se realizan ensayos de jarras, para las diferentes concentraciones del coagulante a ensayar. Se toma como base la concentración óptima del sulfato de aluminio comercial (30 mg/L) (tratamiento 1), se prepararon las mezclas *C.longirostrata* -sulfato en las proporciones de concentración siguientes; 2:28 mg/L (tratamiento 2); 4:26 (tratamiento 3); 6:24 (tratamiento 4); 8:22 (tratamiento 5); 10:20 (tratamiento 6) y 12:18 (tratamiento 7). Las velocidades de mezclado y de sedimentación durante la prueba de jarras con las mezclas coagulantes, se realizan de la misma manera que como se obtuvo la dosis óptima del sulfato de aluminio comercial, con la diferencia que primero se agregan las concentraciones de sulfato de aluminio en la mezcla rápida y durante la mezcla lenta se agregaron las concentraciones del *C. longirostrata*. Al final del experimento a cada mezcla se le midieron los parámetros de caracterización de la calidad del agua (turbiedad, color, pH y temperatura).

Análisis Estadístico

Se utilizó un análisis de varianza para encontrar diferencias estadísticas significativas entre el coagulante sulfato de aluminio y las mezclas de polvo de *C. longirostrata* y sulfato de aluminio. Se llevó a cabo un contraste múltiple de medias de Tukey para ver que tratamientos eran diferentes entre sí.

Resultados

Dosis Óptima de Sulfato de Aluminio para la remoción de Turbiedad

El análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ($P < 0.001$) entre los promedios de la variable turbiedad (NTU) del agua residual, bajo los efectos diferentes tratamientos de dosis de sulfato de aluminio evaluadas (0, 100S.A, 150S.A, 200S.A, 250S.A y 300S.A) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajos de turbiedad (NTU) fue el 250S.A con 9.92 ± 1.28 , seguido por los tratamientos 300S.A y 200S.A con promedios de 14.47 ± 0.69 , 18.07 ± 1.09 respectivamente. Los valores promedios más altos de turbiedad se apreciaron en los tratamientos 0, 100S.A y 150S.A con 47.4 ± 3.09 , 28.9 ± 2.19 y 21.4 ± 1.93 respectivamente, como se puede apreciar en la figura 2.

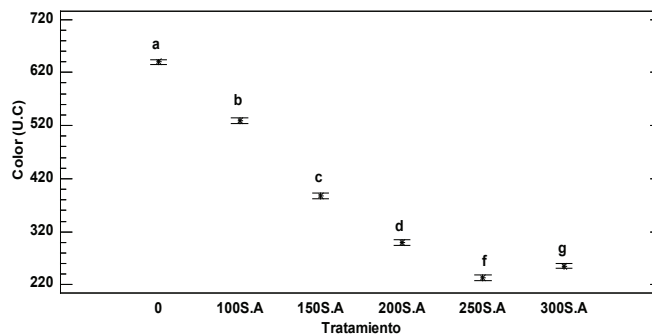


Figura 2. Valores promedios (\pm DE) de la variable turbiedad de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluados

Dosis Óptima de Sulfato de Aluminio para la Remoción de Color

En el análisis de varianza de una vía realizados nos muestran que existen diferencias altamente significativas ($P < 0.001$) entre los promedios de la variable color (U.C) del agua residual, cuando se les aplica diferentes tratamientos de dosis de sulfato de aluminio evaluadas (0, 100S.A, 150S.A, 200S.A, 250S.A Y 300S.A) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajo de color fue el 250S.A con 233.5 ± 6.45 , seguido por los tratamientos 300.S.A y 200S.A con 255.7 ± 5.8 , 299.5 ± 9.88 respectivamente. Los tratamientos que mostraron los valores promedios más altos de color fueron 0, 100S.A y 150S.A con 639.5 ± 5.80 , 529.0 ± 5.94 , 387.5 ± 7.76 respectivamente, tal cual se observa en la figura 3.

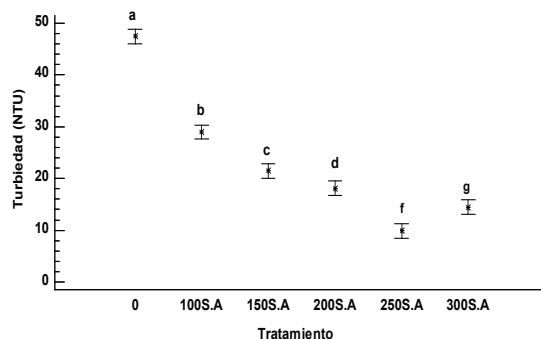


Figura 3. Valores promedios (± DE) de la variable color de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluada

Dosis de Mezclas de Polvo *C.longirostrata* y Sulfato de Aluminio para la Remoción de Color

El análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ($P < 0.001$) entre los promedios de la variable color (U.C) del agua residual cuando están bajo el efecto de diferentes tratamientos de mezclas de *C. longirostrata* en polvo y dosis de sulfato de aluminio evaluadas (125S.A -125CH, 150S.A-75CH, 250S.A, 200S.A-50CH, 225S.A-25CH y 150S.A-100CH) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajos de color fue el 125SA-75CH con 230.5 ± 4.20 , seguido por los tratamientos 250SA, 200SA-50CH y 225S.A-25CH con promedios de 247.0 ± 4.96 , 274.0 ± 5.47 , 281.5 ± 8.10 respectivamente. Los valores promedios más altos de color se observaron en los tratamientos 125S.A-125CH y 150S.A-100CH con promedios de 380.2 ± 6.99 , 288.7 ± 5.56 respectivamente, como se ve en la figura 4.

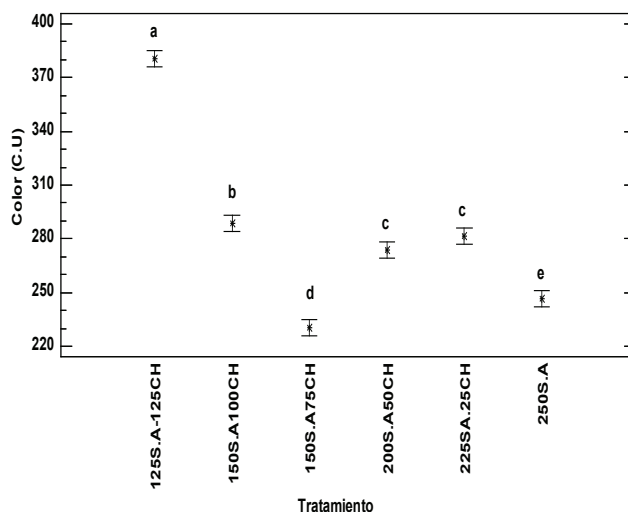


Figura 4. Valores promedios (± DE) de la variable color de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas

Dosis de Mezclas de polvo *C.longirostrata* en Polvo y Sulfato de Aluminio para la Remoción de Turbiedad

El análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ($P < 0.001$) entre los promedios de la variable turbiedad (NTU) del agua residual cuando están bajo el efecto de diferentes tratamientos de mezclas de *C.longirostrata* en polvo y dosis de sulfato de aluminio evaluadas (125S.A -125CH, 150S.A-75CH, 250S.A, 200S.A-50CH, 225S.A-25CH y 150S.A-100CH) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). Los tratamientos que mostraron los valores promedios más bajos de turbiedad fueron 150SA-75CH y 250S.A 9.4 ± 0.96 , 9.07 ± 5.22 respectivamente, seguido por los tratamientos 200SA-50CH, 150S.A-100CH y 225SA-25CH con 13.9 ± 1.20 , 14.3 ± 1.79 , 15.1 ± 1.53 respectivamente. El valor promedio más alto de turbiedad se observó en el tratamiento 125S.A-125CH con 21.75 ± 1.91 , tal cual se observa en la figura 5.

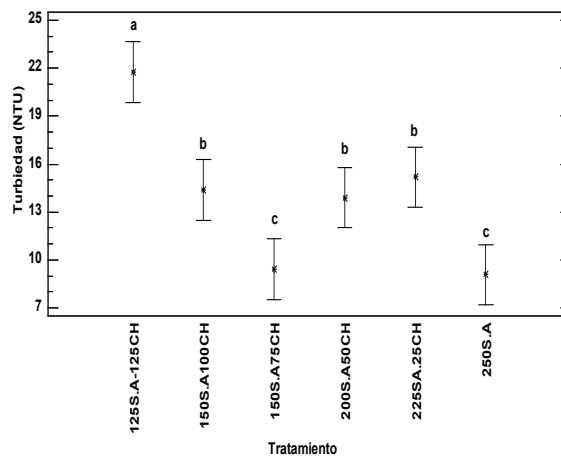


Figura 5 Valores promedios (\pm DE) de la variable turbiedad de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas

Conclusiones y/o recomendaciones

Las mezclas de polvo de *C. longirostrata* con sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ removieron una mayor cantidad de turbiedad y color que la dosis óptima de sulfato de aluminio en aguas residuales. La mezcla coagulante 150S.A75CH (150 mg/L de sulfato de aluminio y 65 mg/L polvo de *C.longirostrata*) mostro el porcentaje más alto de remoción de turbiedad y color (83.4% NTU y 64.9% U.C respectivamente) que la dosis óptima de sulfato de aluminio (82.5% NTU y 62.4 U.C). Los resultados de este trabajo lograron reducir en un 35% el uso del sulfato de aluminio, lo cual es de suma importancia, ya que las dosis de sulfato de aluminio utilizadas comúnmente en el tratamiento de aguas para la reducción de turbiedad y color dejan residuos de aluminio en el agua, que causan daños a la salud y los ecosistemas. El uso del polvo de la *C. longirostrata* como coadyuvante en la remoción de turbiedad y color no tiene efectos tóxicos ya que es un arbusto comestible. Es recomendable seguir haciendo estudios con el polímero de *C. longirostrata* en diferentes tipos de aguas residuales por ejemplo aguas residuales industriales, aguas residuales domésticas y aguas residuales urbanas ya que en este estudio solo se utilizó agua superficial.

Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico superior de Comalcalco, Instituto Tecnológico de Centla y a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la ayuda técnica de su personal y usos de laboratorio.

Referencias

- [1] R. Olivero Verbel, A. Florez Vergara, L. Vega Fellizola, & G. Villegas de Aguas. "Evaluación de una mezcla para coagulantes naturales, Opuntia ficus y Moringa oleifera en clarificación de aguas". *Producción + Limpia*, 12(2), 71-79 <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a6>
- [2] A. Nath, A. Mishra and P. P. Pande. "A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment, Materials Today: Proceedings" <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.551a>
- [3] D. Choque-Quispe, Y. Choque-Quispe, A. M Solano-Reynoso., & B. S. Ramos-Pacheco. "Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. Tecnología Química". 38(2), 298-309. 2018. Recuperado en 31 de octubre de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200008&lng=es&tlng=es.
- [4] C. Banchón; R. Baquerizo; D. Muñoz; L. Zambrano. "Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales". Enfoque UTE, vol. 7, núm. 4, Octubre-Diciembre, pp. 111-126. 2016. Universidad Tecnológica Equinoccial DOI: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.118>
- [5] P. Agarwal, G. Saini. "Use of natural coagulants (Moringa oleifera and Benincasa hispida) for volume reduction of waste drilling slurries." *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.924.2021>
- [6] M. Carpio, C. Ruiz, D. Esenarro, C. Rodríguez, G. García, J. Breña. "Natural Coagulant Based on Mango Seeds (Mangifera indica L) in Removal of Turbidity of Domestic Wastewater." *International Journal of Advanced Science and Technology*. Vol. 29, No. 7 pp. 2726 – 2734. 2020. <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/18144/9197>
- [7] B.I. Gandiwa, L.B. Moyo, S. Ncube, T.A. Mamvura, L.L. Mguni, N. Hlabangana. "Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (Moringa Oleifera-Cactus Opuntia-alum blend)." *South African Journal of Chemical Engineering*. Vol. 34 pp. 158–164. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.07.005>
- [8] K. S. Lim, V. Sethu, A. Selvarajoo. "Natural plant materials as coagulant and flocculants for the treatment of palm oil mill effluent." *Materials Today: Proceedings*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.483>.
- [9] Y. Fernández-Gutiérrez, C. Ruiz-Huamán. "Tratamiento de agua residual mediante aplicación de sulfo de aluminio y biopolímero natural de tamarindo (Tamarindus indica)." *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*. Vol 6 No. 2 pp: 28-34. 2020. https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/index ISSN 2410-843x (en línea)
- [10] J. P. Laguna González, "Determinación de la actividad biológica y caracterización de extractos de chípulin (*Crotalaria longirostrata*) con potencial aplicación a alimentos". Tesis de licenciatura. Depto. Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Saltillo, Coah. 2016. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/8378>
- [11] R. SOLIS SILVAN, J. R LAINES CANEPA, J.R. HERNÁNDEZ BARAJAS. "Mezclas con potencial coagulatne para clarificar aguas superficiales." *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 28, núm. 3, 2012. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300005&lng=es&nrm=iso

Evaluación de la variación en la concentración de aldehídos en agua de lluvia y aire: caso de estudio en un área de conservación de Costa Rica

Quantitative assessment of aldehydes in air and rainwater: a case study in natural conservation area of Costa Rica








Melissa Araya-Araya¹, José Pablo Sibaja-Brenes², Roy Soto-Fallas³, José Carlos Mora-Barrantes⁴, Rosa Alfaro-Solís⁵, Henry Borbón-Alpízar⁶, Juan Valdés-González⁷

Fecha de recepción: 27 de enero, 2022

Fecha de aprobación: 3 de abril, 2022

Araya-Araya, M; Sibaja-Brenes, J.P; Soto-Fallas, R; Mora-Barrantes, J.C; Alfaro-Solís, R; Borbón-Alpízar, H; Valdés-González, J. Evaluación de la variación en la concentración de aldehídos en agua de lluvia y aire: caso de estudio en un área de conservación de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 143-154.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5993>

- 1 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: melissa.araya.araya@una.est.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-6866-9603>
- 2 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: jose.sibaja.brenes@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>
- 3 Laboratorio de Productos Naturales y Ensayos Biológicos, Escuela de Química, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: roy.soto.fallas@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6983-540X>
- 4 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>
- 5 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: rosa.alfaro.solis@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7413-4210>
- 6 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: henry.borbon.alpizar@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-0869-4126>
- 7 Universidad Tecnológica de Panamá. Ciudad de Panamá. Correo electrónico: juan.valdes@utp.ac.pa
 <https://orcid.org/0000-0002-8641-927X>

Palabras clave

Aldehídos; acetaldehído; formaldehído; bosque; cromatografía; detector UV.

Resumen

Los aldehídos en el ambiente se encuentran entre la mayoría de los compuestos orgánicos que participan en las reacciones fotoquímicas en la atmósfera, formando principalmente radicales en cantidades significativas. Además, presentan efectos nocivos sobre la salud de los habitantes de las ciudades con atmósferas contaminadas, principalmente compuestos como el formaldehído y el acetaldehído. En el presente trabajo se determinó, durante el 2017, la concentración de siete aldehídos en muestras de aire y agua de lluvia en un área de conservación de Costa Rica, llamada Reserva Biológica Los Cusingos, ubicada en el Pacífico Sur, Pérez Zeledón. Para el muestreo y el análisis de los aldehídos se utilizó el método TO-11A (EPA). El muestreo utilizó con cartuchos de adsorción recubiertos con una disolución de 2,4-dinitrofenilhidracina (2,4-DNFH). Las muestras fueron cuantificadas por medio de un cromatógrafo líquido acoplado a un detector UV-Visible. Las mayores concentraciones de aldehídos en las muestras de aire corresponden a formaldehído ($62.2 \pm 3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), acetaldehído ($88.1 \pm 4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y acroleína ($102.2 \pm 5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en un periodo de 4 horas. Se determinó que el heptanal fue el aldehído menos contribuyente a la cantidad de aldehídos totales, al encontrarse por debajo del límite de detección ($< \text{LC} = 0.015 \text{ mg}/\text{L}$). Para las muestras de agua de lluvia, el único aldehído cuantificado fue el formaldehído cuya concentración osciló entre (0.00439 ± 0.0062 a 0.08 ± 0.13) mg/L . Los resultados obtenidos en la muestra de aire sugieren un aumento en la concentración de aldehídos correlacionados con la radiación solar y con la temperatura, sugiriendo como principal contribuyente las reacciones fotoquímicas que se llevan a cabo en el aire con hidrocarburos precursores para la generación de contaminantes secundarios.

Keywords

Aldehydes; acetaldehyde; formaldehyde; forest; Chromatograph; UV-detector.

Abstract

Aldehydes in the environment are among most organic compounds that participate in photochemical reactions, mainly forming radicals in significant quantities. These have harmful effects on the health of the inhabitants of cities with polluted atmospheres, mainly formaldehyde and acetaldehyde. In the present work, the concentration of seven aldehydes in air and rainwater samples in a conservation area of Costa Rica (Los Cusingos Biological Reserve, located in the South Pacific, Pérez Zeledón) was determined during 2017. For the sampling and analysis of the aldehydes, the TO-11A (EPA) method was used. Sampling used adsorption cartridges coated with a 2,4-dinitrophenylhydrazine (2,4-DNFH) solution. The samples were quantified by means of a liquid chromatograph coupled to a UV-Visible detector. The highest aldehyde concentrations in air samples correspond to formaldehyde ($62.2 \pm 3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), acetaldehyde ($88.1 \pm 4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and acrolein ($102.2 \pm 5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) during 4 hours of sampling. Heptanal was determined to be the least contributory aldehyde, as it was below the detection limit. The only aldehyde quantified in the rainwater samples was formaldehyde. The results obtained in the air sample suggest an increase in the concentration of aldehydes correlated with solar radiation and temperature, suggesting as the main contributor the photochemical reactions that take place in the air with precursor hydrocarbons.

Introducción

La atmósfera se puede dividir en varias capas de acuerdo con la variación de la temperatura con la altura, siendo la troposfera la región más activa, la cual es la capa que contiene alrededor del 80 % de la masa total del aire y casi todo el vapor de agua de la atmósfera [1]. Posee la mayor influencia sobre la superficie terrestre y se pueden encontrar gran cantidad de especies trazas, cuya presencia se relaciona con procesos geológicos, biológicos, químicos y antropogénicos [2]. En la atmósfera existen contaminantes primarios y secundarios, los primeros emitidos directamente desde una fuente, sin embargo, en la mayoría de los casos son los contaminantes secundarios los de mayor importancia, ya que se forman por medio de procesos fotoquímicos que actúan sobre los contaminantes primarios o incluso sobre especies no contaminantes en la atmósfera [3]. Entre los contaminantes primarios se encuentran los aldehídos, los cuales son compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVBs) que contienen el grupo carbonilo y un doble enlace carbono-oxígeno. Son componentes importantes de la química atmosférica y se forman por la degradación fotoquímica de otros compuestos orgánicos, como los hidrocarburos. Estos pueden ser emitidos a la atmósfera por fuentes biogénicas o antropogénicas [2].

Entre las fuentes naturales de los COVBs se encuentran los ecosistemas forestales, particularmente en el trópico existe una gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles biogénicos, los cuales comprenden alrededor del 90 % (1150 TgC/año) de las emisiones globales de los compuestos orgánicos volátiles (COV) [4]. La producción de los COVBs tiene su origen en los diferentes tejidos vegetales, siendo emitidos mediante diversos procesos fisiológicos, acumulándose en órganos especializados en hojas y tallos, desprendiéndose o almacenándose, según sea la especie [5].

Con respecto a las fuentes antropogénicas, la mayoría de los hidrocarburos son emitidos por la combustión de vehículos y motores de combustión interna. La oxidación de estos compuestos origina contaminantes secundarios en la atmósfera como aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, peróxidos, entre otros. La condensación de aldehídos y cetonas produce aerosoles de olor peculiar, que además limitan la visibilidad [6]. El formaldehído (HCHO) y el acetaldehído (CH_3CHO), son los aldehídos más simples, según su fórmula molecular, y son compuestos emitidos directamente a la atmósfera desde una variedad de fuentes naturales y no naturales. Las emisiones antropogénicas de estos aldehídos se concentran en las zonas urbanas, y están entre los 25 COV de más alta emisión no natural en los Estados Unidos [7]. La importancia de los aldehídos en la atmósfera y el interés por el estudio del comportamiento de estos ha aumentado a lo largo de los últimos años, debido a que los compuestos carbonílicos desempeñan un papel importante en un gran número de procesos que ocurren en la atmósfera. Esto es debido a que son: a) contaminantes primarios emitidos a la atmósfera como residuos procedentes de la combustión incompleta de combustibles fósiles o por emisiones biogénicas, b) contaminantes secundarios procedentes de reacciones que ocurren en la atmósfera, c) fuente esencial de radicales libres para la fotoquímica troposférica, y d) los más importantes en atmósferas contaminadas (son los compuestos que más fácilmente se fotolizan en la atmósfera [8]). No obstante, a pesar de la importancia de los COVBs en los procesos atmosféricos, estos presentan también efectos sobre la salud humana y animal que han sido marco de discusión por científicos en los últimos años. Pequeñas exposiciones a formaldehído y a otros aldehídos específicos, tales como el acetaldehído, acroleína y crotonaldehído, causan irritación en los ojos, en la piel y en la membrana mucosa del tracto respiratorio superior [9].

Estudios con animales indican que, a elevadas concentraciones, muchos aldehídos y cetonas deben ser considerados como altamente citotóxicos y genotóxicos, como consecuencia de provocar ataques nucleofílicos a grupos funcionales amino y sulfhídricos de biomoléculas, tales como proteínas, ácidos nucleicos, glutatión y cisteína. Consecuentemente, estos aldehídos

tóxicos causan complicaciones biológicas de distinto tipo, incluyendo arteriosclerosis, enfermedades cardiovasculares, carcinogénesis, enfermedades inflamatorias, displasia mamográfica, gastritis crónica y displasia precancerosa [10] [11].

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la variación de la concentración de los aldehídos en el agua de lluvia y en el aire en la Reserva Biológica Los Cusingos, Pérez Zeledón, con el propósito de comparar los resultados con investigaciones realizadas en sitios con características similares de preservación. Esto puede aportar información sobre las características naturales o antropogénicas de emisión de los aldehídos, además de generar datos que sirvan como base para seguir llevando a cabo monitoreos de estos compuestos en esta área de conservación.

Materiales y métodos

Sitios de estudio

El muestreo de aldehídos en aire y en agua de lluvia se realizó en la Reserva Biológica Los Cusingos, ubicada en el Pacífico Sur, Pérez Zeledón [12]. La reserva forma parte del Corredor Biológico Dr. Skutch, con las coordenadas 09°20'17" Norte y 83°37'37" Oeste, a una altura de 725 m s.n.m. También, colinda con el Parque Nacional Chirripó (Figura 1), y es atravesado por el río Peñas Blancas. Además, a 5 km al noreste, se tomaron muestras de agua de lluvia en la Reserva Biológica Las Nubes, un proyecto de la Facultad de Estudios Ambientales de la Universidad de York, Canadá, ubicada al noreste del Parque Nacional Chirripó, en las coordenadas 09°23'17" Norte y 083°36'03" Oeste.

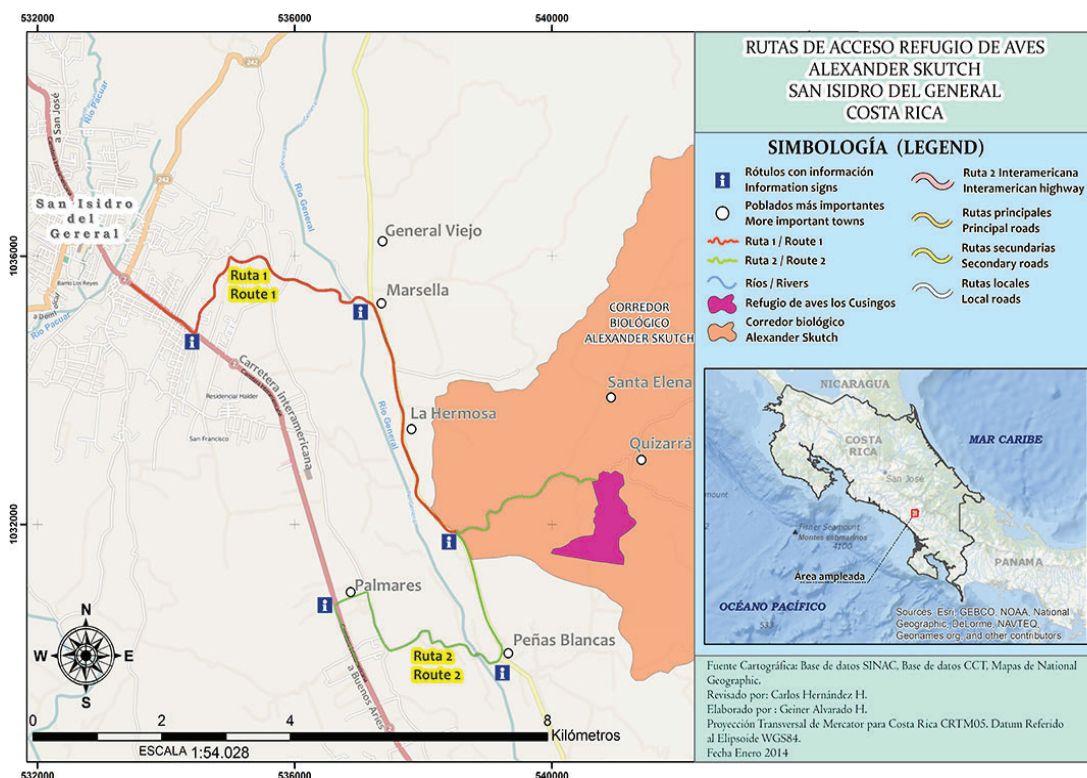


Figura 1. Localización geográfica de la Reserva Biológica Los Cusingos [12].

Condiciones meteorológicas

Los datos de las condiciones meteorológicas de la Reserva Biológica Los Cusingos se obtuvieron del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, específicamente de la estación meteorológica número 98097 Montecarlo, Pérez Zeledón, ubicada a 4 km aproximadamente de la zona de estudio, en las coordenadas 09°21'28" Norte y 83°36'03" Oeste, a una altura de 1005 m s.n.m.

Muestreo y análisis

La recolección de las muestras de aire se realizó con cartuchos de adsorción recubiertos con una disolución de la 2,4-dinitrofenilhidrazina (2,4-DNFH) recristalizada. El sistema de muestreo consistió en una bomba de diafragma que permite pasar el aire a través de los cartuchos, una trampa de seguridad para proteger la bomba de una posible entrada de agua, una válvula de punto crítico para regular el flujo de aire que entra al sistema y un filtro de policarbonato o de fibra de vidrio, para evitar que las partículas que se encuentren en el aire se depositen en los cartuchos y generen una interferencia [13].

El sitio de muestreo para la toma de muestras de aire se ubicó en el área de los Jardines Pamela Lankaster en la Reserva Biológica Los Cusingos, a 1.5 m de altura, y aproximadamente a 3 m de distancia de la vegetación, en las coordenadas 09°20'17.5" Norte y 83°37'37.5" Oeste, a una altura de 725 m s.n.m.

El sistema de muestreo en el agua de lluvia consiste en una botella de polietileno ámbar Nalgene de 1 L y un embudo de polietileno de espiga corta de 13 cm de diámetro (lavados con ácido clorhídrico 1 mol/L y agua desionizada). El embudo se introduce en la botella mediante un tapón de hule perforado. En el extremo inferior del embudo se coloca un cedazo de polietileno para evitar la entrada de partículas sólidas. La altura a la cual se colocó la botella fue de 1.5 m del piso, no existiendo obstáculos cercanos a la toma de muestra que pudiesen afectar los resultados a una distancia de 20 m [13].

La toma de muestras de agua de lluvia fue ubicada a 30 m aproximadamente de la toma de muestras de aire, en las coordenadas 09°20'16.6" Norte y 83°37'35.7" Oeste, a una altura de 712 m s.n.m. La determinación de la concentración de los aldehídos analizados tanto para las muestras de aire como de lluvia (formaldehído, acetaldehído, acroleína, propanal, butanal, hexanal y heptanal) se realizó durante un periodo de 3 semanas de muestreo, comprendidas entre junio y julio del 2017, tomándose muestras durante 4 h, 2 veces al día. Estas muestras se almacenaron para ser analizadas posteriormente.

Para el análisis de los aldehídos en ambas matrices (aire y lluvia) se utilizó la metodología publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) método TO-11A [14]. El análisis de las muestras se realizó en un cromatógrafo acoplado a un detector Dionex Ultravioleta Visible UV-VIS, mediante inyección manual. Las condiciones de análisis para la determinación de los aldehídos fueron: Temperatura del horno: 45 °C, fase móvil: acetonitrilo:agua 60:40, flujo: 1.2 mL/min, columna Agilent C18, 150 mm de longitud y 4.6 mm de diámetro interno, detector Dionex UV-Vis, longitud de onda ($\lambda = 365$ nm). Se utilizó el programa Chromeleon 6.0 para determinar las áreas de los patrones y de las muestras. Los datos meteorológicos fueron proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica [12].

Resultados y discusión

Concentración de aldehídos en aire

Para las mediciones de la concentración de aldehídos en aire, se estudió la variación temporal en tres campañas de muestreo. Las variaciones en las campañas se muestran en las Figuras 2, 3 y 4. Para la primer campaña de muestreo, la Figura 2 muestra la variación de la concentración promedio diaria de los aldehídos en la Reserva Biológica Los Cusingos. La acroleína, el acetaldehído y el formaldehído presentaron las concentraciones promedio diarias mayores de los aldehídos en estudio, con valores que alcanzaron los $(102.2 \pm 5.2) \mu\text{g}/\text{m}^3$, los $(88.1 \pm 4.9) \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los $(62.2 \pm 3.1) \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Para el caso del hexanal, el 23 de junio aumentó su concentración promedio a $(48.7 \pm 3.5) \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual representa hasta 3 veces más de la cantidad obtenida en días anteriores ($10.6 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $18.0 \pm 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este aumento en la concentración de hexanal se pudo deber a factores propios de la naturaleza para el periodo de estudio. Para toda la semana se presentó una temperatura con valores entre $22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ y $24.9 \text{ }^\circ\text{C}$, favoreciendo la volatilidad y posiblemente, las velocidades de oxidación por medio de las reacciones fotoquímicas [15]. Los valores promedios diarios reportados durante la primera campaña de muestreo para: formaldehído, acetaldehído, acroleína, propanal, butanal, hexanal y heptanal fueron: $(40.8 \pm 4.4) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(56.1 \pm 46.3) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(60.1 \pm 6.7) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(4.4 \pm 1.7) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(3.0 \pm 1.8) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(18.9 \pm 4.9) \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $(1.70 \pm 0.98) \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Se muestra una mayor cantidad de aldehídos de cadena corta, los cuales son productos secundarios de las reacciones fotoquímicas de los COV en el aire.

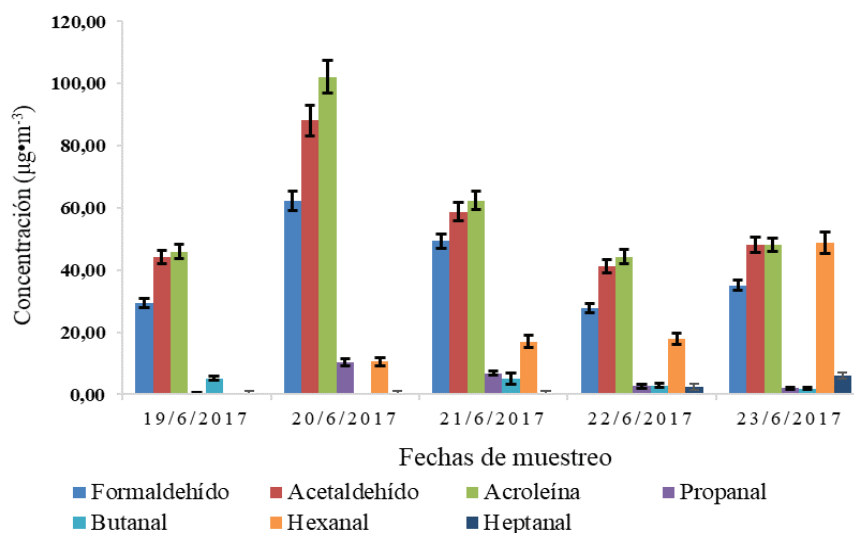


Figura 2. Variación de la concentración promedio diaria de los aldehídos en la Reserva Biológica Los Cusingos, en la primer campaña de muestreo (19 al 23 junio del 2017).

En la figura 3 se muestra la variación de la concentración promedio diaria de los aldehídos en la Reserva Biológica Los Cusingos durante la segunda campaña de muestreo. Para esta campaña la concentración en el aire de la acroleína estuvo por debajo del límite de detección. El acetaldehído se encontró en mayor abundancia con respecto a los demás compuestos, presentado valores entre $(17.0 \pm 1.1) \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $(52.1 \pm 3.0) \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, el propanal, el butanal y el hexanal no sobrepasaron los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el muestreo, encontrándose por debajo del límite de cuantificación. Los valores promedios diarios de concentración reportados

para los aldehídos: formaldehído, acetaldehído, propanal, butanal y hexanal fueron $(17.2 \pm 2.3) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(31.6 \pm 4.1) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(2.45 \pm 0.92) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(2.7 \pm 8.6) \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $(8.4 \pm 6.7) \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

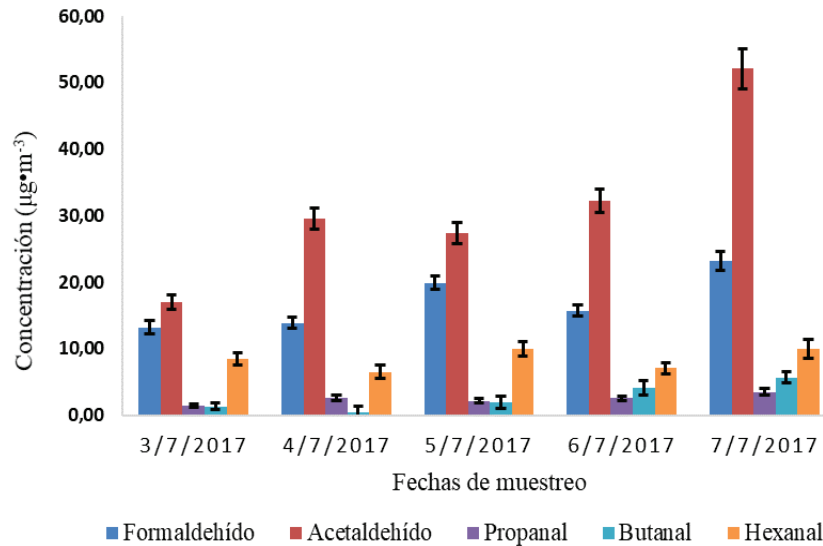


Figura 3. Variación de la concentración promedio diaria de los aldehídos en la Reserva Biológica Los Cusingos, durante el segundo muestreo (el 3 al 7 de julio del 2017).

La figura 4 muestra la tendencia diaria reportada para los aldehídos analizados durante la tercer campaña de muestreo. La mayor concentración diaria corresponde a la acroleína, con un valor de $(47.0 \pm 2.5) \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la menor concentración corresponde al heptanal, con una magnitud de $(2.00 \pm 0.29) \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se observa además en la Figura 4, diferencias muy marcadas entre las concentraciones de los aldehídos de cadena corta con respecto a los de cadena larga, con diferencias entre el 75 % a 80 %.

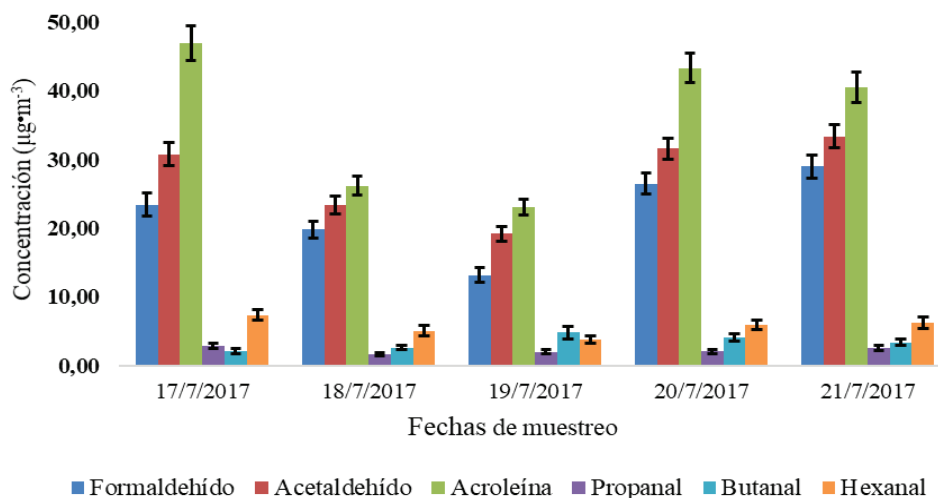


Figura 4. Variación de la concentración promedio diaria de los aldehídos en la Reserva Biológica Los Cusingos, durante el tercer muestreo (17 al 21 de julio del 2017).

Al tomar en cuenta las tres campañas de muestreo, se encontró una correlación de Pearson fuerte (Triola, 2004) de la radiación y de la temperatura con respecto a la concentración de los aldehídos analizados, lo cual sugiere que la cantidad de los compuestos carbonílicos en el aire estaría muy relacionada con las reacciones fotoquímicas y con la evapotranspiración de las plantas. Para los periodos de estudio, según los boletines meteorológicos del Instituto Meteorológico Nacional de junio y julio del 2017, junio se caracterizó por tener una influencia de viento predominante en el Pacífico Oriental, golfo de México, Centroamérica, el mar Caribe y el océano Atlántico. Para julio, se presentó una mayor incursión de vientos alisios sobre el país que provocaron una reducción en las precipitaciones, condición conocida como canícula, característica de cada año en julio [22] [23]. Esta situación meteorológica pudo generar la variación de la concentración de aldehídos en el aire durante los dos meses de muestreo, donde se tuvo una mayor cantidad en junio que en julio.

La Figura 5 muestra la variación porcentual de la concentración de cada uno de los aldehídos durante las tres campañas de muestreo en la zona. Durante los tres periodos de muestreo, el formaldehído y el acetaldehído fueron los aldehídos de mayor porcentaje en el aire. La concentración de la acroleína fue alta en la primera y la tercera campaña, pero para el segundo periodo estuvo por debajo del límite de detección. Según las mediciones realizadas por Salazar et al, 2016 en Monteverde en el 2015, las mayores concentraciones de aldehídos fueron reportadas para el acetaldehído, el propanal y el butanal, comportamiento diferente al de este estudio. Esta variación de los aldehídos en Costa Rica se pudo deber a la radiación incidente, la altitud del muestreo y al tipo de vegetación de las zonas de estudio, ya que Monteverde es un bosque nuboso a 1534 m s.n.m. mientras que el Refugio Los Cusingos es un bosque muy húmedo premontano, que se encuentra a una altura de 1005 m s.n.m. Estas variaciones hacen que la vegetación de la zona sea distinta y así sus emisiones de compuestos orgánicos volátiles y de aldehídos.

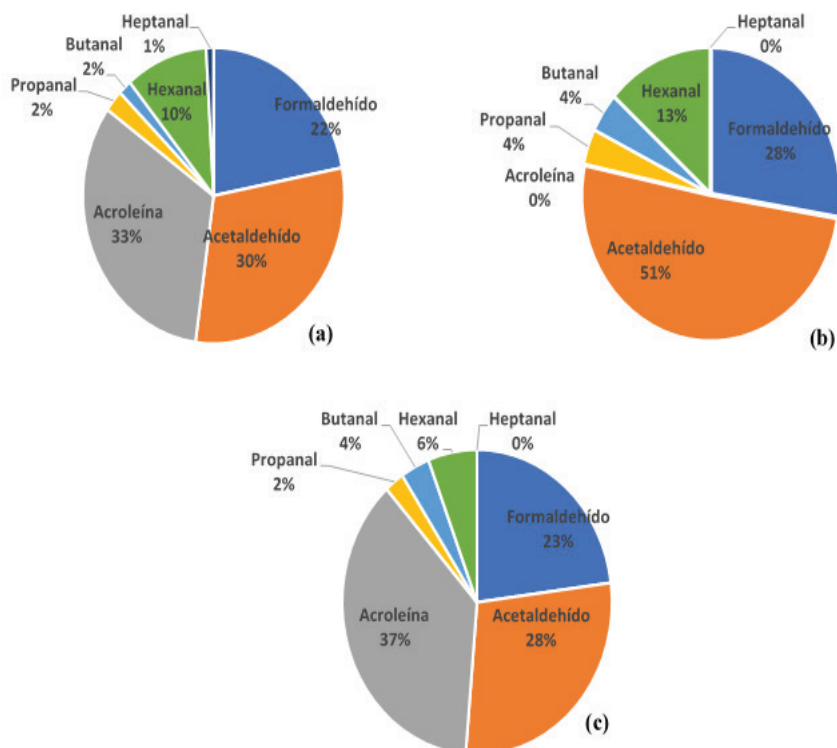


Figura 5. Contribución porcentual de cada aldehído en el (a) primer muestreo, (b) segundo muestreo y (c) tercer muestreo en la Reserva Biológica Los Cusingos.

Durante el presente estudio, fue el formaldehído el compuesto carbonílico reportado con mayor abundancia, lo cual se debe principalmente a que es un producto de la oxidación fotoquímica de los hidrocarburos y de los COV's emitidos por la vegetación. Además, este aldehído, procede de fuentes de emisión primarias, tanto biogénicas como antropogénicas. No obstante, debido a que el tiempo de vida medio que tiene por fotólisis es relativamente corto (8 h), este no se transporta lejos de las fuentes de emisión durante el día [15]. El acetaldehído es el otro de los aldehídos predominante durante los muestreos, según Singh y colaboradores [16], la mayoría de los alcanos y de los alquenos forman acetaldehídos como productos intermediarios de la oxidación fotoquímica. En la atmósfera global, la fuente más grande del acetaldehído proviene de la oxidación del etano y del propano, mientras que el propanal puede ser formado a través de la oxidación fotoquímica de muchos hidrocarburos [16].

Concentración de aldehídos en agua de lluvia

La fuente dominante de aldehídos en el agua de lluvia son los aldehídos en fase gaseosa, que se producen fotoquímicamente en la atmósfera a partir de hidrocarburos antropogénicos o biogénicos naturales [17]. El Cuadro 1 muestra las concentraciones de los aldehídos en el agua de lluvia de las muestras recolectadas en la Reserva Biológica Los Cusingos. El único aldehído que se pudo cuantificar durante los días de precipitación corresponde al formaldehído, el acetaldehído se reportó por debajo del límite de cuantificación, y los demás aldehídos, por debajo del límite de detección.

Cuadro 1. Concentración de los aldehídos en el agua de lluvia en la Reserva Biológica Los Cusingos durante las tres campañas de muestreo, y en Las Nubes.

Fecha	Reserva Biológica Los Cusingos		Proyecto Las Nubes
	Formaldehído (mg/L)	Acetaldehído (mg/L)	Formaldehído (mg/L)
19/06/2017	0.0548 ± 0.0062	< LC = 0.015	NA
20/06/2017	0.0544 ± 0.0062	< LC = 0.015	NA
22/06/2017	0.0439 ± 0.0062	< LC = 0.015	NA
03/07/2017	0.0530 ± 0.0041	< LC = 0.032	NA
06/07/2017	0.0623 ± 0.0041	< LC = 0.032	NA
07/07/2017	0.0623 ± 0.0041	< LC = 0.032	NA
21/07/2017	0.08 ± 0.13	< LC = 0.011	0.08 ± 0.13

Nota: LC: Límite de cuantificación. NA: No analizado

La cuantificación de aldehídos en agua de lluvia depende de factores de estabilidad y solubilidad en el agua. Una posible explicación de la cuantificación del formaldehído (único aldehído cuantificado) en el agua de lluvia es debido a su hidrólisis en el agua, para producir un intermediario muy estable en forma de diol; metilenglicol. El formaldehído tiene una constante de hidratación de 2530 a 25 °C, lo que sugiere que la hidratación es esencialmente completa y prácticamente toda la molécula existe en su forma diol, lo que aumenta su solubilidad en agua en varios órdenes de magnitud [2].

Comparación con otras investigaciones

El cuadro 2 muestra una comparación entre las concentraciones reportadas de los aldehídos en aire en el presente estudio con los valores reportados para otras regiones rurales y boscosas del mundo. Los datos obtenidos presentan valores por lo general más altos que las otras regiones.

Cuadro 2. Comparación entre las concentraciones de los aldehídos en aire en la Reserva Biológica Los Cusingos, con las concentraciones de los aldehídos en aire en otras regiones rurales y boscosas del mundo.

Lugar	Concentración promedio de aldehídos ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)							Período de muestreo
	F	A	Acr	P	B	Hx	Hp	
Reserva Biológica Los Cusingos, Costa Rica (Este estudio)	26.8	38.5	48.3	3.05	9.1	11.0	1.70	Junio-Julio 2017
Reserva Biológica Monteverde (Salazar et al, 2016)	1.95	4.13	ND	8.45	5.42	1.92	0.18	Abr-Jun 2015
Parque forestal de Tijuca, Brasil (Guimaraes et al., 2010)	2.88	1.96	ND	ND	ND	ND	ND	2007-2008
Parque Forestal Prince Hill, Sur de China (Yu et al., 2007)	3.70	3.33	ND	0.90	1.00	1.78	0.81	Agosto 2004
Irazú, Costa Rica (Vega, 2000)	37	22	ND	10	7	3	2	Abr y Dic 1999
Gopalpura, Agra (Khare et al., 1997)	1.7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Junio-Setiembre 1995 y 1996

F= Formaldehído; A=Acetaldehído; Acr=Acroleína; P=Propanal; B=Butanal; Hx=Hexanal; Hp=Heptanal; ND= No detectado

Según lo reportado por Salazar et al 2016 en la Reserva Biológica Monteverde [21], se encontraron prácticamente los mismos aldehídos de la presente investigación, con excepción de la acroleína. El propanal es el único que en Monteverde muestra concentraciones mayores con respecto a los demás aldehídos. Esta diferencia en concentraciones puede deberse al tipo de zona y de vegetación, donde es posible que la radiación solar sea un factor importante para la formación de aldehídos por reacciones fotoquímicas. En Monteverde se suelen presentar precipitaciones abundantes que no permiten que los aldehídos sean cuantificados [12].

En el Bosque de Tijuca, en Río de Janeiro, se obtuvieron concentraciones mucho menores que en Los Cusingos, a pesar que Tijuca alberga cientos de especies de plantas y es uno de los bosques urbanos más grandes del mundo (superficie de 39.51 km²). Sin embargo, es un área montañosa de bosque lluvioso con picos montañosos de hasta 1021 m de altura que forman una barrera natural a la circulación de aire, lo que produce fuertes lluvias de más de 2000 mm al año [18] a diferencia de la Reserva Biológica Los Cusingos, la cual posee un clima muy húmedo premontano. Tijuca al presentar un clima lluvioso tiende a disminuir las emisiones biogénicas de los aldehídos, además que por su altura puede variar la cantidad de radiación que puede ser recibida en la zona, según el periodo del año.

Las concentraciones de los aldehídos reportadas para el Forestal Prince Hill de China y la zona de Gopalpura en la India, están por debajo de las concentraciones de los aldehídos reportadas en Los Cusingos. La zona de Prince Hill se encuentra bajo un clima subtropical [19] y Gopalpura es una zona semi-árida [20], ambas con condiciones de temperaturas distintas a las de Costa Rica y con un tipo de vegetación diferente, con montañas altas a sus alrededores.

Con respecto al análisis realizado en el volcán Irazú en el 2000, en una zona ubicada al noreste del cráter del Volcán, el cual es un punto de entrada de los vientos al Valle Central [13], los resultados de estos análisis en comparación con los de la Reserva Biológica Los Cusingos son similares. Sin embargo, la altura de muestreo y la vegetación que los rodea son bastantes

diferentes. Además, las concentraciones de los aldehídos en la zona del Irazú pueden ser influenciadas por los vientos alisios con presencia de contaminantes antropogénicos, que por efecto de la radiación solar experimentan reacciones fotoquímicas que pueden generar aldehídos en la zona, además de los emitidos por la vegetación propia del lugar [13].

Conclusiones

Las mayores concentraciones de aldehídos en las muestras de aire correspondieron al formaldehído, el acetaldehído y la acroleína, siendo la acroleína la que presentó mayores concentraciones en cada muestreo. Por su parte el heptanal, fue el aldehído menos contribuyente, al encontrarse por debajo del límite de detección en dos campañas de muestreo. Estos resultados obtenidos en las muestras de aire indican un aumento pronunciado en las concentraciones de los aldehídos correlacionados con la radiación solar y la temperatura, sugiriendo que el principal contribuyente de la formación de los aldehídos son las reacciones fotoquímicas que se llevan a cabo en el aire con los hidrocarburos precursores o por emisión directa de los aldehídos. Las condiciones meteorológicas en el país pudieron afectar la concentración de los compuestos carbonílicos en el aire.

Para las muestras de lluvia se identificó solo la presencia de formaldehído, principalmente porque este se disuelve en el agua más fácilmente que los demás aldehídos, y porque se hidroliza formando un diol estable en la disolución. Los demás aldehídos se encontraron por debajo del límite de cuantificación o del límite de detección del método, con excepción de una muestra en donde se identificó al acetaldehído.

Con el fin de generar una base de datos robusta y confiable, se recomienda la ejecución de una mayor cantidad de muestreos en la Reserva de estudio, bajo distintas épocas del año y con mayor cantidad de puntos de muestreo, con el fin de comparar los datos de acuerdo con la altura y la vegetación de la zona.

Agradecimientos

A los autores les gustaría agradecer al Centro Científico Tropical (CCT) y sus colaboradores de la Reserva Biológica Los Cusingos, por permitir el libre acceso a la reserva para la toma de muestras. Además, agradecer a los administradores del Proyecto Las Nubes, Facultad de estudios Ambientales de la Universidad de York, Canadá, por la colaboración y permitir que se tomarán muestras de agua de lluvia en sus instalaciones.

Referencias

- [1] R. Chang, y K. Goldsby, Química. China: Mc Graw Hill Education, 2013.
- [2] J. Seinfeld, and S. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [3] S. Manahan, Introducción a la química ambiental. España: Reverté, 2007.
- [4] L. Mielke, K. Pratt, P. Shepson, S. McLuckey, A. Wisthaler, and A. Hansel, "Quantitative determination of biogenic volatile organic compounds in the atmosphere using proton-transfer reaction linear ion trap mass spectrometry," *Analytical Chemistry*, vol 82, no 19, pp.7952-7967, 2010. <https://doi.org/10.1021/ac1014244>
- [5] E. Pichersky, and J. Gershenzon, "The formation and function of plant volátiles: perfumes for pollinator attraction and defense," *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 5, no 3, pp. 237-243, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(02\)00251-0](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(02)00251-0)
- [6] E. Muños, y M. Grau, Ingeniería Química. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.



- [7] H. Simon, L. Beck, P. Bhave, F. Divita, Y. Hsu, D. Luecken, D. Mobley, G. Pouliot, A. Reff, G. Sarwar, and M. Strum, "The development and uses of EPA's SPECIATE database," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 1, no 4, pp. 196-206. 2010. <https://doi.org/10.5094/APR.2010.026>
- [8] M. Salgado, "Estudio cinético de las reacciones de interés atmosférico, reacciones del radical NO₃ con aldehídos," Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, España, 2001.
- [9] B. Delgado, "Compuestos carbonílicos en muestras de interés medioambiental y agroalimentario," Tesis doctoral, Universidad de la Laguna, Tenerife, España, 2009.
- [10] J. Kinsella, and D. Hwang, "Biosynthesis of flavors by *Penicillium roqueforti*," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 18, no 7, pp. 927-938, 1976. <https://doi.org/10.1002/bit.260180706>
- [11] G. Lees, and G. Jago, "Role of acetaldehyde in metabolism: a Review 1. Enzymes catalyzing reactions involving acetaldehyde," *Journal of Dairy Science*, vol. 61, no 9, pp. 1205-1215, 1978. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(78\)83708-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(78)83708-4)
- [12] Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Clima de Costa Rica. Pacífico Sur. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/PacificoSur.pdf/e9ff2013-e30e-46a3-ad39-934200753fff> (accesado el 17 de enero, 2019).
- [13] D. Vega, "Aplicación de dos técnicas analíticas de muestreo para la determinación de aldehídos en aire y en agua de lluvia en tres zonas de Costa Rica". Tesis de maestría, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2000.
- [14] EPA. Environmental Protection Agency. Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air. U.S. 1999. <https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/airtox/to-11ar.pdf> (accesado 24 de Marzo, 2016).
- [15] John H. Seinfeld, Spyros N. Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, 2016. ISBN 1118947401.
- [16] H. B. Singh, L. J. Salas, R. B. Chatfield, E. Czech, A. Fried, J. Walega, M. J. Evans, B. D. Field, D. J. Jacob, D. Blake, B. Heikes, R. Talbot, G. Sachse, J. H. Crawford, M. A. Avery, S. Sandholm, and H. Fuelberg, "Analysis of the atmospheric distribution, sources, and sinks of oxygenated volatile organic chemicals based on measurements over Pacific during TRACE-P," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 109, no 15, pp. 1-20, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JD003883>
- [17] R. Peña, S. García, C. Herrero, M. Losada, A. Vásquez, and T. Lucas, "Organic acids and aldehydes in rainwater in a northwest region of Spain," *Atmospheric Environment*, vol. 36, no 34, pp. 5277-5288, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00648-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00648-9)
- [18] C. Guimaraes, D. Custodio, R. Oliveira, L. Varandas, and G. Arbillá, "Comparative study of automotive, aircraft and biogenic emissions of aldehydes and aromatic compounds," *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 84, no 2, pp. 180-184, 2010. doi: 10.1007/s00128-009-9891-5
- [19] Y. Yu, S. We, H. Lu, Y. Feng, X. Wang, G. Sheng, and J. Fu, "Characteristics of atmospheric carbonyls and VOCs in Forest Park in South China," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 137, no 1-3, pp. 275-285, 2008. Doi:10.1007/s10661-007-9759-2
- [20] P. Khare, G. Satsangi, N. Kumar, M. Kumari, and S. Srivastava, "HCHO, HCOOH and CH₃COOH in air and rainwater at a rural tropical site in North Central India". *Atmospheric Environment*, vol. 31, no 23, pp. 3867-3875, 1997. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00263-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00263-X).
- [21] Brenda Salazar-López, José Pablo Sibaja-Brenes, Juan Valdés-González, Gerardo Rodríguez-Rodríguez. Evaluación de la concentración de los aldehídos en el aire en la Reserva Biológica Monteverde y en la ciudad de Heredia, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)*. (Junio, 2016). EISSN: 2215-3896. 50(1): 41-52.
- [22] Instituto Meteorológico Nacional. (2017). Boletín Meteorológico Mensual Junio 2017. ISSN: 1654-0465.
- [23] Instituto Meteorológico Nacional. (2017). Boletín Meteorológico Mensual Julio 2017. ISSN: 1654-0465.
- [24] Triola, M. *Estadística*, Novena edición: editorial Pearson Educación, México. 2004; pp 498-510, 742.

Control de flujo de detritos por medio de barreras dinámicas en el trópico, como medio de adaptación al cambio climático, cantón central de Aserrí, quebrada Burío

Control of debris flow through dynamic barriers in the tropic, as a means of adaptation to climate change, Burío stream in Aserrí

David Borge-Leandro¹, Alejandro Antonio Morera-Delgado²

Fecha de recepción: 18 de octubre, 2021
Fecha de aprobación: 23 de febrero, 2022

Borge-Leandro, D; Morera-Delgado, A.A. Control de flujo de detritos por medio de barreras dinámicas en el trópico, como medio de adaptación al cambio climático, cantón central de Aserrí, quebrada Burío. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 155-168.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5844>

1 Universidad Fidélitas de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: dborge80034@ufide.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-9157-8438>

2 Universidad Fidélitas. Costa Rica.
Correo electrónico: alemoreradelgado@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1204-5110>

Palabras clave

Flujo de detritos; sedimento; barrera dinámica; sólidos suspendidos; periodo de retorno; cambio climático.

Resumen

Al 2020 en Costa Rica únicamente, existen tres barreras dinámicas instaladas, dos de las cuales se encuentran en la Quebrada Burío. El cambio climático es un factor determinante ante el incremento de las intensidades de lluvia. Se espera un incremento del 20% para el año 2100 por lo que este dato se toma en cuenta para realizar todos los cálculos hidrológicos del caso de estudio. Al mismo tiempo, la implementación del modelo de Iber 2.5.1 es totalmente necesaria para la comprensión del comportamiento hidrodinámico de la quebrada y asimismo del comportamiento de los sedimentos en suspensión de ésta. Datos como hidrogramas, elevaciones obtenidas por medio de ortofotos de vuelos de aeronaves no tripuladas y concentración de sedimentos son los pilares para generar un modelo para este caso. La velocidad, altura del agua y comportamiento vectorial son los resultados obtenidos del modelo hidrodinámico generado por Iber 2.5.1. Así como el comportamiento de los sedimentos.

Keywords

Debris flow; sediment; dynamic barrier; peak flow; suspended solids; return period; IPCC; climate change.

Abstract

As of 2020 in Costa Rica only exist their dynamic barriers installed, two of them are in Quebrada Burío. Climate change is a determining factor in the face of the increase of rainfall intensities. An increase of 20% is expected for the year 2100, so this data is taken into account to perform all the hydrological calculations of the case study. At the same time, the implementation of Iber 2.5.1 model is totally necessary to understand the hydrodynamic behavior of the stream and also the behavior of its suspended sediments. Data such as hydrographs, elevations obtained through orthophotos of drone flights, and sediment concentration are the pillars to generate a model for this case. The speed, height of the water and vector behavior are the results obtained from the hydrodynamic model generated by Iber 2.5.1. As well as the behavior of sediments.

Introducción

El presente trabajo tiene como fin general determinar el comportamiento de flujo de agua de la quebrada Burío en el cantón central de Aserrí a la cual se colocaron dos barreras dinámicas contra flujos de detritos, así se logra el conocimiento para relacionarlo con otras zonas con características similares en que estas barreras puedan ser colocadas [1] [2].

De esta manera, se modela el comportamiento del río por medio del software IBER 2.5.1 como principal variable el periodo de retorno de 100 años +18% de incremento en la intensidad de lluvias para obtener información de valor sobre lo que sucede en la zona de la barrera en casos de mayor demanda, y si es necesario, tomar las medidas de prevención [3] [4] [5] [6] [7].

Con este estudio se caracterizó el comportamiento que tiene en conjunto el flujo del río y la barrera dinámica en una zona como Costa Rica, con las cualidades propias de la zona.

También se determinaron datos valiosos para próximos diseños de barreras dinámicas en el país, pues, se logra exponer información básica, tener conocimiento del desempeño de las barreras, así, tener un diseño más atinado tomando en cuenta las condiciones climáticas, geológicas y de relieve de la zona de Aserrí. Con esto se puede relacionar otros casos con condiciones similares, asegurar un diseño adecuado para la zona, se permite un diseño idóneo para la vida útil de la barrera, lo más importante, con la posibilidad de prever con mayor criterio, certeza daños materiales y sobre todo, pérdidas de vidas por un desastre natural [3] [4] [1] [8] [9].

Materiales y métodos

La cuenca de la Quebrada Burío se ubica en la provincia de Aserrí, Aserrí Centro, San José (ver figura 1). Es una microcuenca que tiene como área total de drenaje de 2,67 Km² y un perímetro de 9,1 Km.



Figura 1. Cuenca Quebrada Burío.

El desbordamiento de la quebrada es un fenómeno frecuente y especialmente en épocas de invierno, Quebrada abajo se encuentran una cantidad considerable de viviendas y hasta una de las escuelas de Aserrí. Muchas de estas estructuras se encuentran en el borde del cauce de la quebrada. La preocupación de la municipalidad y de la Comisión Nacional de Emergencias por el peligro inminente de la falta de precaución y planificación en la zona, a lo que también se le suma el factor de cambio climático y el incremento en intensidad de lluvias llevaron a dichas entidades colocar barreras dinámicas como método preventivo.

Fuentes de información

La información utilizada para el estudio proviene de las siguientes fuentes:

- Visitas al sitio de estudio, donde se realiza una caracterización, también clasificar y observar cualidades de la zona pertinentes a la investigación realizada, asimismo con vuelos de dron, recolección de muestras de suelos, análisis de las barreras en sitio, etcétera, para lograr una mayor cantidad de información y obtener datos relevantes y lo más exactos posibles.
- Referencias bibliográficas y referencias técnicas. Para el caso de las bibliográficas consta de información obtenida de libros, artículos de revistas, archivos en PDF de entidades confiables, publicaciones científicas, tesis. Para el caso de las referencias técnicas es por medio de, fichas de instalación, manuales catálogos de los productores, información de materiales facilitada por los productores.

- Entrevistas, a personas capacitadas sobre el tema a desarrollar en la investigación.
- Las principales muestras de estudio son tres tormentas en la zona de San José Costa Rica, cada una con una duración de 30 minutos y determinada por la ecuación del estudio de 20 años del señor Vahrson Mora [10] y colaboradores. Dichas tormentas corresponden al periodo de 100 años, y se toma en cuenta que la tormenta que incluye incremento del 18 % en la intensidad de lluvias por el cambio climático.

Diseño

El presente trabajo, primeramente, lleva una investigación teórica extensa para manejar con mayor claridad las características de las barreras dinámicas y de la zona de estudio, problemas, ventajas y diversa información que la literatura puede indicar. Luego se realiza una serie de entrevistas a expertos del tema para lograr un conocimiento más amplio y por ende generar un criterio basado en teoría y práctica.

Una vez con toda la información se procedió a hacer visitas al sitio y extraer información necesaria para hacer el modelo hidrodinámico en el programa Iber 2.5.1 para cumplir los objetivos planteados.

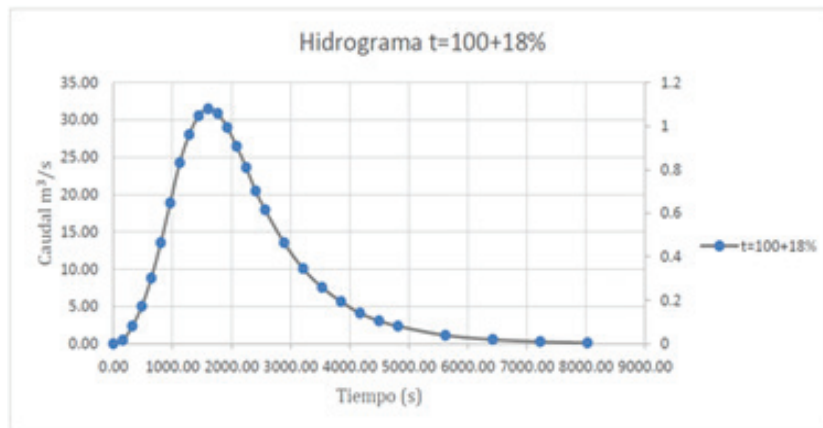


Figura 2. Hidrograma Barrera #1 t=100+18% incremento en intensidad de lluvias.

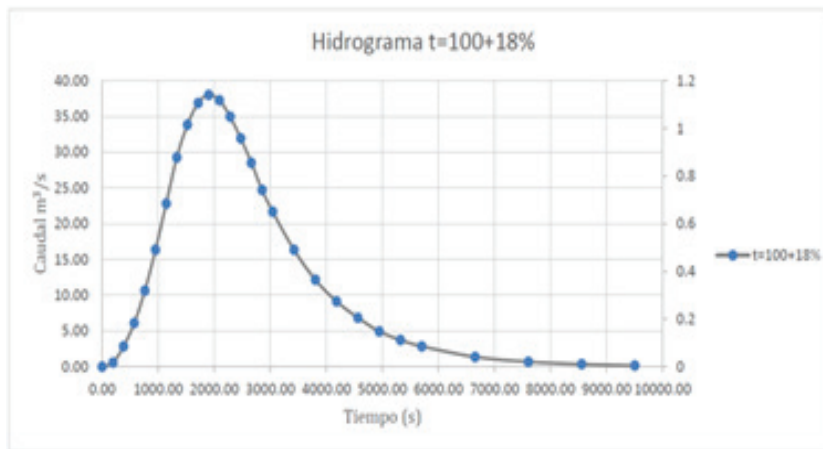


Figura 3. Hidrograma Barrera #2 t=100+18% incremento en intensidad de lluvias.

Sedimentos

Para obtener la concentración media de sólidos en gramos por metro cúbico se realiza una correlación basándose en la investigación del señor Salamea en el año 2015 [9] titulada, Modelamiento Bidimensional Hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos a través del Río Calabí y Obras Hidráulicas [9].

En dicha investigación se expone una tabla de concentración de sedimentos por caudales observados, como se muestra en el cuadro 1 [9] [10].

Cuadro 1. Concentración media Río Calabí [9]

Q (m ³ /S)	Concentración media (g/m ³)
72.80	0.032
315.35	0.264
186.75	0.119
49.78	0.029
34.47	0.040
17.61	0.011
11.95	0.002
7.95	0.017
7.91	0.009
3.10	0.014

Igualmente, como se muestra en el cuadro 2, aporta la granulometría obtenida del muestreo del río, la cual, se adjunta seguidamente: [9]

Cuadro 2. Granulometría Río Calabí [9].

Diámetro del tamiz (mm)	Diámetro del tamiz (malla #)	Peso retenido (g)	Peso retenido corregido (g)	Peso retenido acumulado (g)	Porcentaje de material retenido acumulado	Porcentaje de material que pasa
50.8	2"	188.00	188.00	188.00	4.79%	95.21%
38.1	1 1/2"	524.00	524.00	712.00	18.14%	81.86%
25.4	1"	660.00	661.00	1373.00	34.99%	65.01%
19.05	3/4"	359.00	369.00	1732.00	44.14%	55.86%
12.7	1/2"	417.00	417.00	2149.00	54.77%	45.23%
9.53	3/8"	222.00	222.00	2371.00	60.42%	39.58%
4.75	Nº 4	357.00	357.00	2728.00	69.52%	30.48%
Pasa #4		1196.00	---	---	---	---
2	2	81.63	81.67	81.67	75.73%	24.27%
1	1	69.69	69.69	151.35	81.02%	18.98%
0.71	Nº 25	41.08	41.08	192.43	84.15%	15.85%
0.5	Nº 35	49.33	49.33	241.77	87.90%	12.10%
0.355	Nº 45	59.70	59.70	301.47	92.43%	7.57%
0.25	Nº 60	59.34	59.34	360.81	96.94%	3.06%
0.18	Nº 80	19.00	19.00	379.81	98.39%	1.61%
0.125	Nº 120	12.41	12.41	392.22	99.33%	0.67%
0.09	Nº 170	4.89	4.89	397.11	99.70%	0.30%
0.063	Nº 230	2.36	2.36	399.46	99.88%	0.12%

De modo que, si se tiene en cuenta, estos datos toman como referencia la concentración media de 0.032 g/m³ y el caudal de 72.80 m³/s. Así como los valores de la granulometría del tamiz #4, debido a que este nos suministra una referencia de la cantidad de arena que presenta la muestra.

Para esta investigación se efectúa un estudio de laboratorio de muestras del lecho de la Quebrada Burío, se consigue, la granulometría indicada en el cuadro 3.

Cuadro 3. Granulometría Quebrada Burío.

Tamiz N°	% retenido	% pasado
2"	1.3%	98.6%
1"	7.9%	90.7%
3/4"	3.7%	87%
1/2"	12%	74.7%
3/8"	5.9%	69%
1/4"	13.4%	55.6%
4	5.1%	50.4%
8	12.4%	38.1%
16	10.3%	27.8%
30	11.5%	16.4%
50	9%	7.3%
100	2.6%	4.7%
200	2.7%	1.9%
Charola	1.9%	0%

Para efectos de la Quebrada Burío un 50,4 % del material del lecho del cauce pasa la malla o tamiz #4 y en la investigación de Salamea (2015) corresponde a un 30,48 % de material pasando el mismo tamiz, eso quiere decir que existe una diferencia de 19.92 % de material tipo arena [9].

Tomando en cuenta la diferencia de 19,92 % y la concentración media de 0,032 g/m³ y el caudal de 72,80 m³/s brindada por el estudio de Salamea (2015). Se procede a aumentar el 0,032 g/m³ de concentración media un 19,92 %: $0,032 * 1,1992 = 0.038 \text{ g/m}^3$

Se logra así la concentración media de 0.038 g/m³ para un caudal de 72,80 m³/s en condiciones de la Quebrada Burío. Con estos datos se cumple con la siguiente ecuación:

$$72,80 = Q \cdot 0,038 \cdot X$$

Donde:

Q: Caudal obtenido de los hidrogramas

X: Concentración media de sedimentos suspendidos g/m³ (dato por averiguar)

Elevaciones por medio de DTM (figuras 4 y 5)

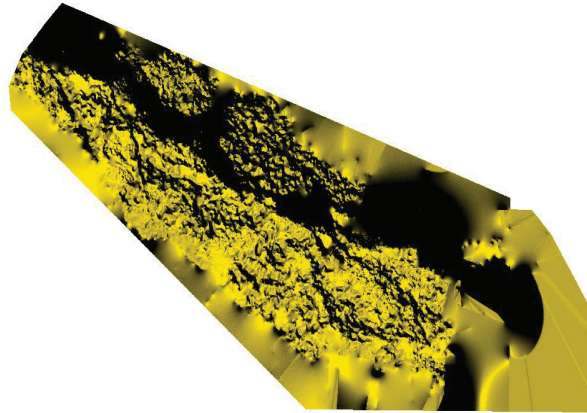


Figura 4. DTM Quebrada Burío Barrera #1.

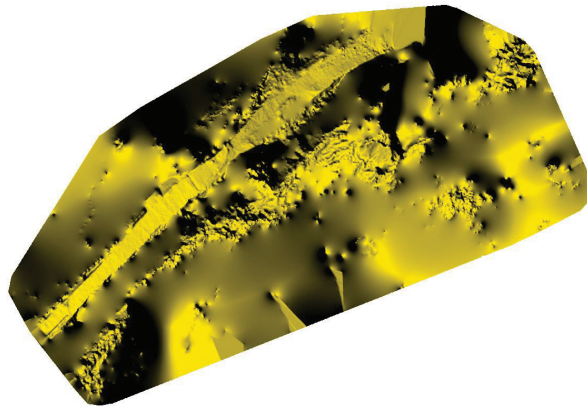


Figura 5. DTM Quebrada Burío Barrera #2.

Resultados

Barrera #1: Todos los resultados tomados del modelo en Iber 2.5.1 son correspondientes al segundo 1605, ya que, es en el instante que presenta mayor caudal, por lo tanto, el momento más crítico.

Se muestran los resultados de velocidad, calado y comportamiento vectorial de la barrera #1 en los dos periodos de retorno (50 y 100 años) y el caso de incremento de intensidad de lluvia por el cambio climático.

Las imágenes corresponden al orden de $t = 50$ años superior izquierda, $t = 100$ años superior derecha, $t = 100$ años + 18 % inferior centro (figura 6).

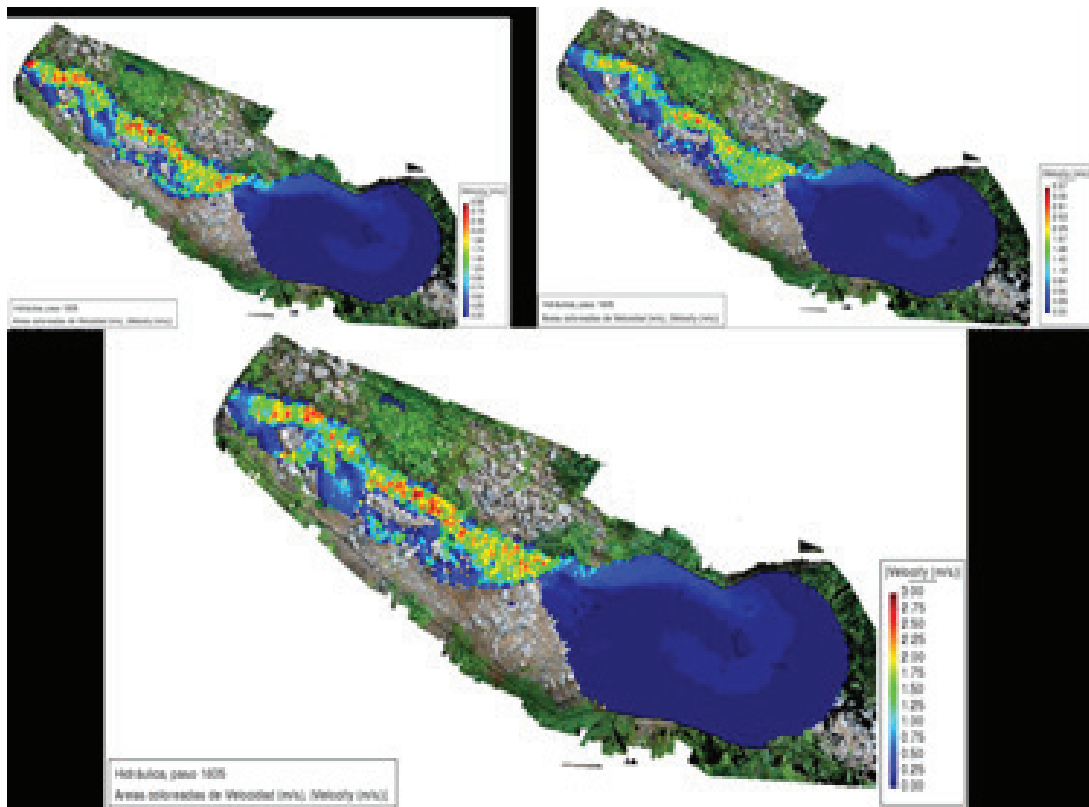


Figura 6. Velocidades Barrera #1 según modelo.

Es notorio cómo la barrera genera una especie de represa donde la velocidad se reduce a valores aproximados a 0 m/s. Las velocidades máximas en el instante de estudio corresponden a $t = 50$: 2,98 m/s $t = 100$: 3,37 m/s $t = 100 + 18\%$: 3 m/s

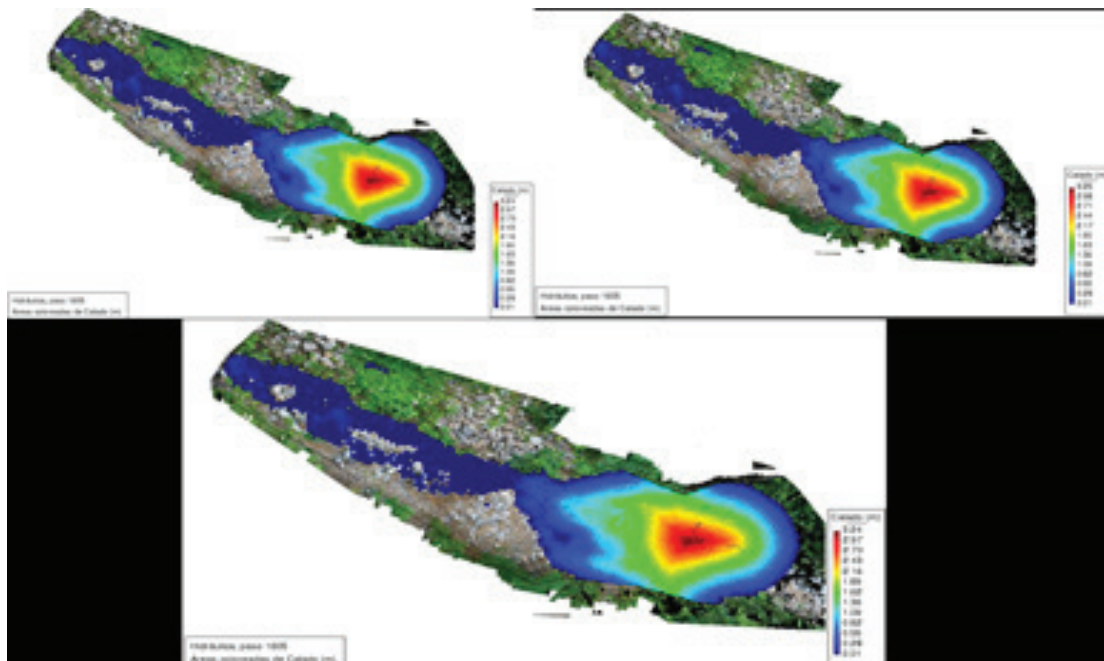


Figura 7. Calado Barrera #1 según modelo.

En los tres casos de estudio rondan los 3,24 y 3,25 metros, por lo que es evidente, que el agua se retiene hasta la altura máxima de la barrera. El cambio que es detectable corresponde a que las áreas donde el calado ronda desde un metro hasta dos metros aumentan en tamaño, esto es resultado del incremento del caudal (ver figura 7).

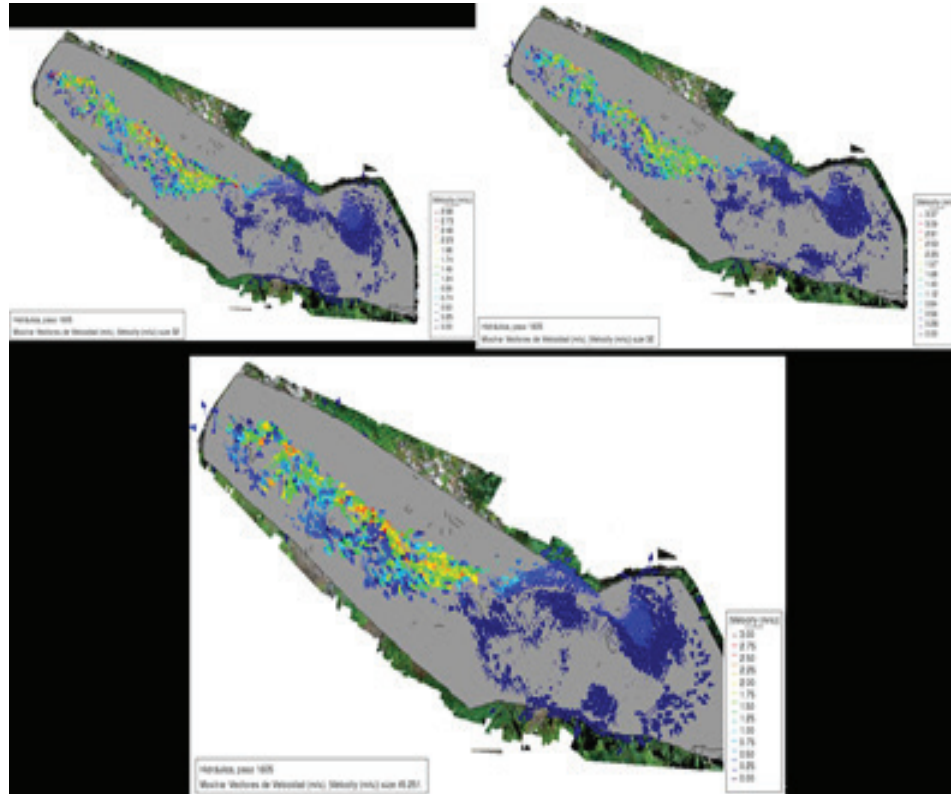


Figura 8 Vectores de velocidad y dirección Barrera #1 según modelo.

El flujo transcurriría de manera directa y aumentando constantemente su velocidad hasta llegar al punto de concentración de agua debido a la obstrucción creada por la barrera. Es posible afirmar que el flujo a la hora de encontrarse con la barrera tiene un comportamiento más reducido en impacto, esto debido a los vórtices creados, acumulación de agua y que los vectores de dirección no son constantes solo río abajo (figura 8). Eso quiere decir, que la energía y velocidad son reducidos notoriamente y en resultado de esa disminución, la capacidad destructiva y potencial pérdida de control sobre el flujo se reducen también.

Barrera#2: Todos los resultados tomados del modelo en Iber 2.5.1 son correspondientes al segundo 1900, ya que, es en el instante que presenta mayor caudal, por lo tanto, el momento más crítico.

Se presentan los resultados de velocidad, calado y comportamiento vectorial de la barrera #2 en los dos periodos de retorno (50 y 100 años) y el caso de incremento de intensidad de lluvia por el cambio climático.

Las imágenes corresponden al orden de t= 50 años superior izquierda, t= 100 años superior derecha, t = 100 años + 18 % inferior centro (figura 9).

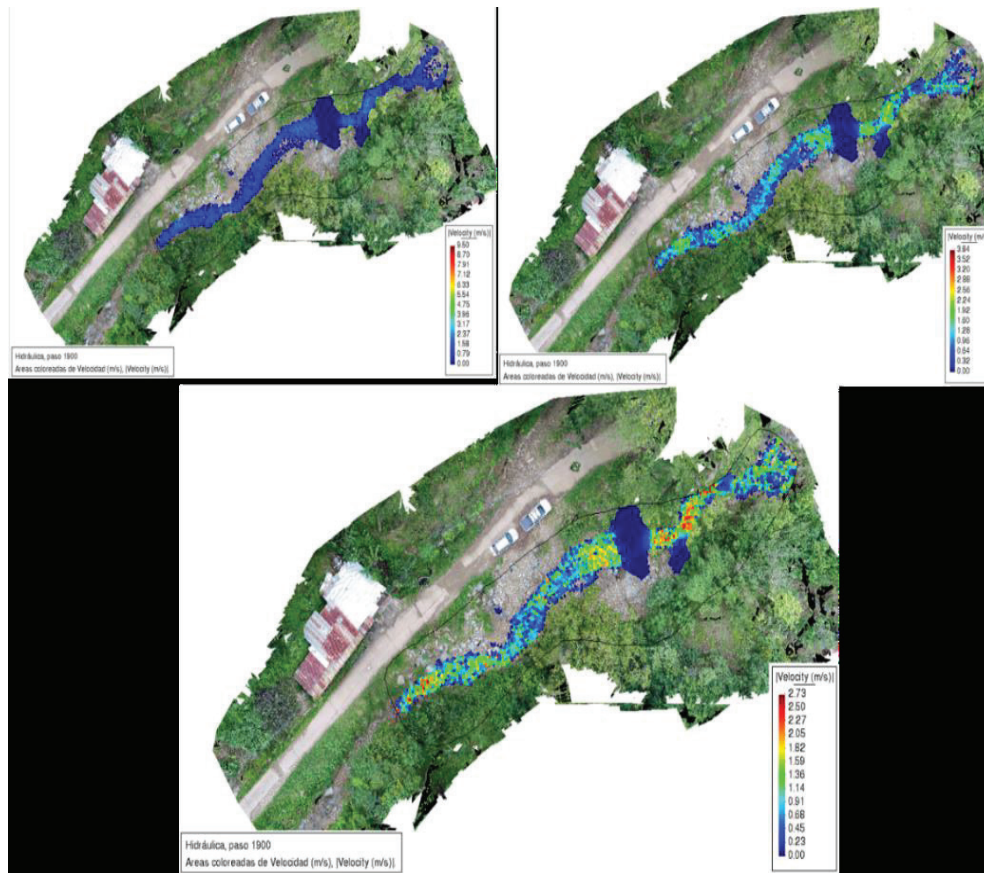


Figura 9. Velocidades Barrera #2 según modelo.

Esta barrera se encuentra llena a la hora de generar el estudio, por lo que su impacto es justo posterior a su ubicación, no genera un comportamiento de retención previo a ella, sino una especie de cascada.

La barrera crea una caída de agua, donde la velocidad en el instante posterior a la caída se reduce a valores aproximados a 0 m/s. Las velocidades máximas en el instante de estudio corresponden a $t= 50$: 2,37 m/s $t=100$: 3,84 m/s $t=100 + 18 \%$: 2,73m/s.

Con las condiciones de la barrera llena de material sedimentario el valor máximo de calado siempre corresponde al mismo, ya que, es proporcional a la altura de caída del fluido, en este caso el calado máximo es de 0,95 m (ver figura 10).

Se logra el comportamiento vectorial en función de la velocidad del flujo (figura 11). Es representado por los vectores que el flujo transcurre de manera regular quebrada abajo, aumentando constantemente su velocidad hasta llegar al punto de caída de flujo debido a la barrera llena de material sólido. Es posible afirmar que el flujo a la hora de caer de la barrera tiene un comportamiento multidireccional y, sobre todo, se generan vórtices en los costados de la descarga de flujo. Eso quiere decir que la energía y velocidad son reducidos notoriamente y en resultado de esa disminución, la capacidad destructiva y potencial pérdida de control sobre el flujo.

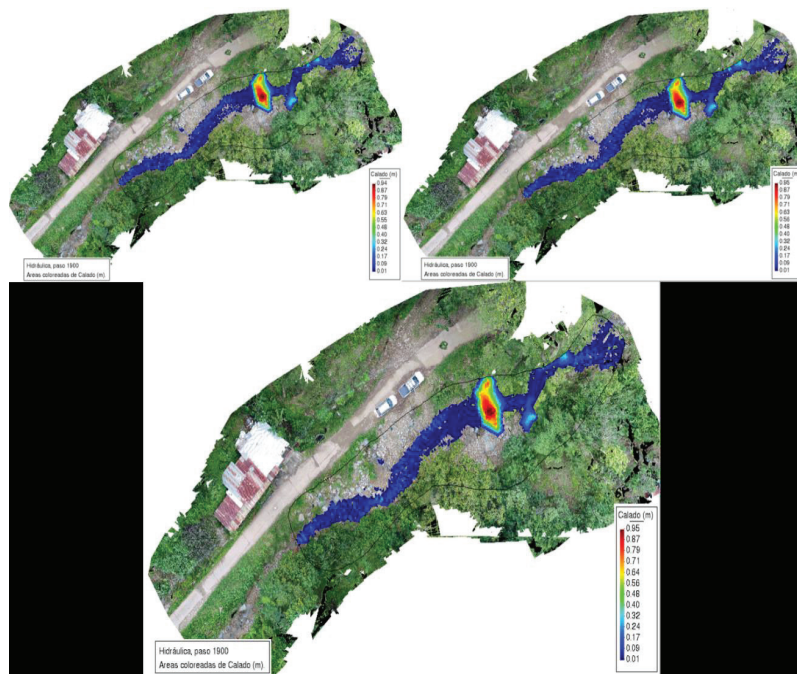


Figura 10. Calado Barrera #2 según modelo.

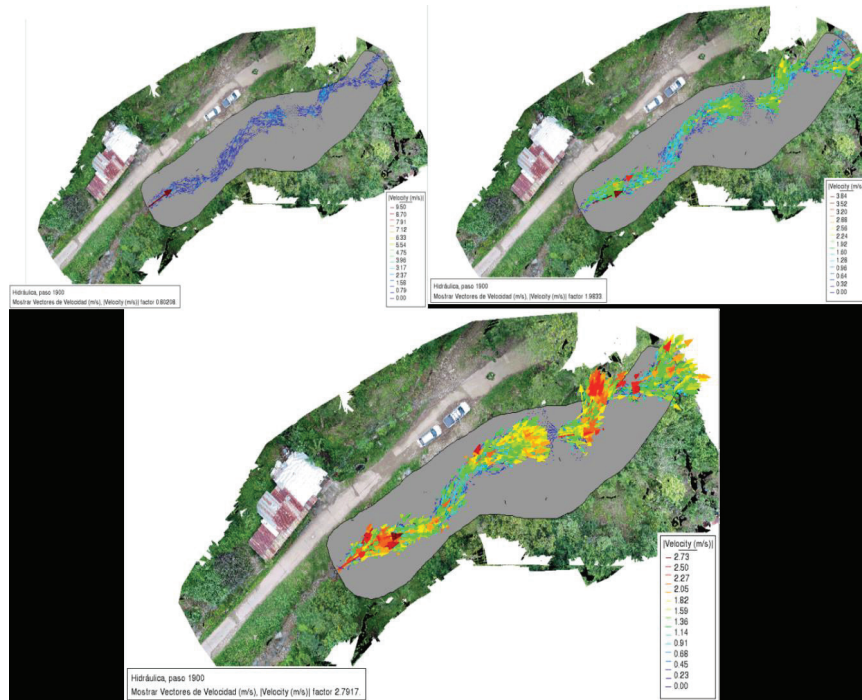


Figura 11. Vectores de velocidad y dirección Barrera #2 según modelo.

Análisis de Sedimentos

El análisis de sedimentos se realiza únicamente en las barreras para el periodo de retorno de 100 años + 18 % de incremento de lluvias. Esto debido a que se define que dicho periodo de retorno es el más crítico, el que contiene más caudal y por ende mayor transporte de sedimentos, es decir, es cuando la barrera tiene mayor exigencia, por lo que, si cumple para el caso mencionado, evidentemente cumple para los más leves.

Barrera #1

La barrera se analiza en el momento de caudal pico, el cual corresponde a 31, 48 m³/s en el segundo 1605,28. Se logra una concentración máxima de sedimentos suspendidos de 2 g/l, lo que representa 2 kilos por metro cúbico de fluido (ver figura 12).

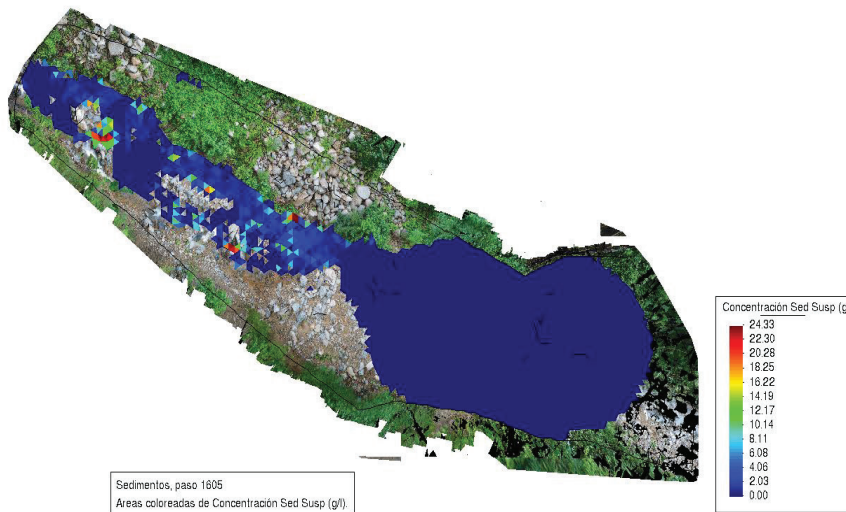


Figura 12. Concentración de sedimentos Barrera #1.

Ahora ya se tiene, como resultado un total de 134,93 m³ de sólidos retenidos.

Barrera #2

La barrera se analiza en el momento de caudal pico, que corresponde a 38, 01 m³/s en el segundo 1901,36. Se obtiene una concentración máxima de sedimentos suspendidos de 31 g/l, lo que representa 31 kilos por metro cúbico de fluido (ver figura 13).



Figura 13. Concentración de sedimentos Barrera #2.

Ya una vez, que se tiene como resultado un total de 2991 m³ de sólidos retenidos.

Discusión de resultados

Como fue evidente observar en todas las simulaciones, incluyendo velocidad, vectores y cota de altura de agua, las barreras ubicadas en la zona de estudio cumplen su función, reteniendo una cantidad de sólidos considerable, disminuyendo su velocidad a prácticamente 0m/s, lo que podemos traducir a una capacidad destructiva muy reducida a la que podría tener en un inicio. También es muy específico que en las zonas de las barreras aumenta el volumen de agua acumulada, por lo que el área de cobertura del agua es mayor a la que se tenía previo al obstáculo (barrera), junto a esto es evidente que las zonas en donde se colocan las barreras es una zona de alta cantidad de vectores en muchas direcciones y vórtices, que podemos traducirlo a zonas de alta erosión. Es necesario prestar alta atención a este dato y reforzar esas zonas contra la erosión, y tomarlo en cuenta en el diseño.

Fue posible realizar una comparación casi que directa con otras investigaciones, específicamente con las tituladas Quantitative Prediction of Outburst Flood Hazard of the

Zhouqu “8.8” Debris Flow-Barrier Dam in Western China [11], Evaluation of flexible barrier and sabo dam to control effects of debris flow in Santo Domingo Ravine [12] y Protection systems against debris flows [13]. Estas investigaciones fueron basadas en barreras dinámicas arrojando resultados similares, en las tres, se determina la disminución en la velocidad del flujo, así mismo la depositación de sólidos en la barrera. Pero existe una variable a considerar, el relieve, pendiente y forma del cauce de la quebrada o río, se determina que si bien es cierto las barreras cumplen su función inicial, la pendiente y relieve tienen un factor sumamente importante, ya que en una relación directa, éstas variables afectan en que tan recomendable es el uso de estas barreras.

El por qué estas variables son tan necesarias a tomar en cuenta, es debido a la zona o área que se inunda previo o posterior a la barrera, causando en algunos casos, más daño del que podría evitar. Por lo que en conclusión no solo es importante tener en cuenta el cambio climático por su incremento en intensidad de lluvias, periodos de retorno, caudales pico, etc, sino también un buen levantamiento topográfico y una buena resolución en la malla de valores ingresada en los modelos, es fundamental a la hora de utilizar este tipo de barreras.

Conclusiones y/o recomendaciones

Se modeló la quebrada hidrodinámicamente obteniendo datos de sus velocidades, calado y comportamiento vectorial en los tres escenarios de estudio. El uso del modelo en dos dimensiones Iber 2.5.1 es vital para obtener la representación más semejante a lo que se observa en sitio. En todos los resultados es posible observar el desempeño de las barreras dinámicas cumpliendo su objetivo principal, el cual es el control del flujo de detritos y la reducción del potencial riesgo que puede generar un evento natural.

La evaluación del desempeño en las barreras en la Quebrada Burío se realiza satisfactoriamente, obteniendo datos como la cantidad de metros cúbicos de material sólido que debe retener cada una para el evento más crítico estudiado. El análisis de la barrera #1 permite concluir que la cantidad de metros cúbicos de material sólido a retener en ese punto específico no es tan significativa como podría ser en otro sitio; eso no le resta importancia a su funcionamiento, solo que puede ser más aprovechada en otro sector de la quebrada. Para la barrera #2 solo es posible evaluarla llena, pero ésta si se encuentra en una zona donde la concentración de sólidos es mayor y por ende su beneficio y desempeño está siendo mejor.

En ambos casos fue posible observar como las velocidades del flujo rondan los 3m/s previo a la barrera dinámica. Una vez se encuentran con estos elementos, ya sea vacía o llena, generando un efecto de choque directo o caída tipo cascada, logra retener una cantidad de flujo representativa y llevando sus velocidades a prácticamente 0m/s.

Referencias

- [1] Cuerpo de Ingeniero de los Estados Unidos de América., «Evaluación de Recursos de Agua de Costa Rica.,» *United States Southern Command*, 1996.
- [2] Geobruigg, «Contra los riesgos naturales: Los sistemas Geobruigg garantizan el más alto grado de protección.,» *Geobruigg*.
- [3] E. Baldé, L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón y A. Coll, «ScienceDirect,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454>. [Último acceso: marzo 2020].
- [4] Acción por el clima, «Web Oficial Union Europea,» 2015. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es#tab-0-0. [Último acceso: febrero 2020].
- [5] C. C, «Mexico y el cambio climático global,» *UNAM*, 2006.
- [6] B. D, «Uso de barreras contra caídos en Costa Rica.,» *Universidad De Costa Rica*, 2015.
- [7] A. Quiñones, «Escorrentía,» *Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño*, 2017.
- [8] Geobruigg, «Barreras dinámicas contra flujos de detritos.,» *Geobruigg*, 2011.
- [9] T. Salamea Guillén, «MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL HIDRODINÁMICO DEL FLUJO Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS A TRAVÉS DEL RÍO CALABÍ Y OBRAS HIDRÁULICAS.,» *Universidad de Cuenca*, 2015.
- [10] M. Villón, «Precipitación,» p. 25, 2011.
- [11] G. C. Y. C. J. J. W. S. Heyi Yang, «Quantitative Prediction of Outburst Flood Hazard of the Zhouqu “8.8” Debris Flow-Barrier Dam in Western China,» *MDPI*, p. 20, 2021.
- [12] A. C, 2015. [En línea]. Available: <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/fesamcentral/12281.pdf>. [Último acceso: febrero 2020].
- [13] C. J, «DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE BARRERAS,» *UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA*, 2017.
- [14] D. Á. E, «Hidrodinámica,» *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 2014.
- [15] Geobruigg, «Barreras flexibles de anillos para retención de flujos de detritos: la solución económica.,» *Geobruigg*.
- [16] IPCC, «Cambio climático 2007 informe de síntesis.,» *IPCC*, 2007.
- [17] IPCC, «Cambio climático 2014 informe de síntesis,» *IPCC*, 2014.
- [18] MINAE, Dirección de Cambio Climático, & EPYPSA., «PLAN DE ACCIÓN DE LA Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC).,» *MINAE*, 2015.
- [19] J. & R. C. Moyano, «Génesis y características de un nuevo flujo de detritos en Lo Valdés, Cajón del Maipo, Chile.,» *The University of Manchester*, 2011.
- [20] J. Ordoñez, «Qué es una cuenca hidrológica.,» *Sociedad Geográfica de Lima*, 2011.
- [21] C. Smith, «La intensificación de las precipitaciones provocará un aumento de la contaminación del agua en el futuro.,» *National Geographic & NASA Earth Observatory.*, 2017.
- [22] R. B. · L. S. · A. S. · R. S. · G. Capparelli, «Debris flow impact on a flexible barrier: laboratory flume,» *Springer Nature*, p. 22, 2021.
- [23] G. e. f. l.-d. i. a. t. a. to, «Dongri Song, Gordon G.D. Zhou, Xiao Qing Chen, Jie Li, Anli Wang, Peng Peng,» *Engineering Geology*, p. 11, 2021.
- [24] N. B. · J. S. · M. M. · T. J. · J. J. ·, «Investigation of potential debris flows above the Koroška Bela settlement, NW,» *Landslides*, p. 16, 2021.
- [25] D. S. · Y. B. · X. Q. C. · G. G. D. Z. · C. E. C. · A. P. · P. Peng, «Assessment of debris flow multiplesurge load model based on the physical process,» *Landslides*, p. 13, 2021.
- [26] C. R. Q. L. L. M. R. Luis Fonseca1, «Protection systems against debris flows,» *WIT Press*, vol. 94, p. 10, 2007.
- [27] L. F. C. N. J. W. Cabrera Cabrera, «Evaluation of flexible barrier and sabo dam to control effects of,» *DigitalCommons@USU*, p. 12, 2016.
- [28] A. L. Wong, «Development of a novel design approach for rigid landslide debris-resisting barriers,» *HKIE Transactions*, vol. 28, nº 4, p. 14, 2021.