

La Granja Revista de Ciencias de la Vida • Volumen 34 • Número 2 • septiembre 2021 - febrero 2022. Revista semestral de Ciencias de la Vida de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación internacional bilingüe dedicada a estudios relacionados con ciencias ambientales, de la tierra, agropecuarias, biológicas, y sus líneas transversales de conocimiento. Las ideas y opiniones expresadas en las colaboraciones son de exclusiva responsabilidad de los autores y autoras.

EQUIPO EDITORIAL

Consejo de Editores (Editorial Board)

Editores en Jefe (Editors-in-Chief)

Dr. Ignacio de los Ríos, Universidad Politécnica de Madrid, España
MSc. Sheila Serrano Vincenti, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Editor Asociado (Associate Editor)

Dr. Sabino Armenise, Universidad Rey Juan Carlos, España
Dr. César Álvarez Mendoza, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dr. Tony Viloria, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
Dr. Ernesto Delgado, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Coeditor Internacional en inglés (International coeditor in English)

Dr. Lorenzo Guerrini, Università di Firenze, Italia

Coeditor Internacional en portugués (International Coeditor in Portuguese)

Dr. Rocio Elizabeth Contero Callay, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Consejo Científico (Advisory Board)

Dr. Guillermo Marcillo, University of Illinois Urbana Champaign, EEUU
Dr. Alessandro Medici, Università di Ferrara, Italia
Dr. John Mejía, Universidad de Nevada, Estados Unidos
Dr. Enrica Caporali, Università di Firenze, Italia
Dr. Ankit Singla, Ministry Office of Agriculture, Co-operation and Farmers Welfare, India Government
Dr. Paola Vita Finzi, Università di Pavia, Italia
Dr. Giovanni Vidari, Università di Pavia, Italia
Dr. Flavio Contreras-Torres, Universidad Autónoma de México, México
Dr. Miguel A. Altieri, University of California, EEUU
Dr. Clara Inés Nicholls, University of California, EEUU
Dr. Jaime Vadel Adrover, Universidad de las Islas Baleares, España
Dr. Janeth Patricia Muñoz Erasó, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
Dr. Marcos Villacís, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dr. Silvia Perez Damonte, Universidad de Buenos Aires, Argentina
Dr. Fernando Funes Monzote, Universidad de Matanzas, Cuba
Dr. Alessandra Guerrini, Università di Ferrara, Italia
Dr. Giovanni Bernacchia, Università di Ferrara, Italia
Dr. León Escobar Moreira, SYNAPTRONIC, EEUU
Dr. Lorenzo Guerrini, Università di Firenze, Italia
Dr. José Luis Santos, International CLIVAR Project Office, China
Dr. Solveig Tosi, Università di Pavia, Italia
Dr. Priscila dos Santos Silva, Universidad de Sao Paulo, Brasil
Dr. Connie Gallardo Vela, Universidad de Sao Paulo, Brasil
Dr. Thomas Condom, Institut de Recherche Pour Le Développement, Francia
Dr. Leonardo Basile, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dr. Claudinéia Brazil, Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre, Brasil
Dr. Alejandro Fontana, Universidad de Piura, Perú
Dr. Adriana Sánchez Urdaneta, Universidad de Zulia, Venezuela
Dr. Emmanuel Donkor, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, West Africa
Dr. Jorge Palomeque Santiago, Instituto Mexicano del Petróleo, México
Dr. Carlos Hernandez Medina, Centro Universitario Municipal Camajuaní, Cuba
Dr. Daniel A. Lowy, Northern Virginia Community College, EEUU
Dr. László Palcsu, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Marjan Temovski, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Elemer Laszlo, Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences, Hungría
Dr. Pablo Marini, Universidad Nacional de Rosario, Argentina
Dr. Antonio Panico Università degli Studi Pegaso, Italia
Dr. Fernando Bimbela, Universidad Pública de Navarra, España
Dr. Panagiotis Kechagiopoulos, University of Aberdeen, Reino Unido
Dr. Carlo Visconti, Politecnico di Milano, Italia

Dra. Marta Elena Alonso, Universidad de León, España
Dra. Alison Hanlon, University College Dublin, Irlanda
Dr. Mehmood Ali, NED University of Engineering and Technology, Pakistán
Dra. Ana Teodoro, Universidade do Porto, Portugal

Consejo de Publicaciones (Publication Board)

Dr. Juan Cárdenas Tapia PRESIDENTE
Dr. Javier Herrán Gómez ABYA-YALA
Dr. José Juncosa Blasco ABYA-YALA
Dr. Juan Pablo Salgado VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN
Dr. Angel Torres-Toukourmidis EDITOR DE UNIVERSITAS
Dr. Jaime Padilla Verdugo EDITOR DE ALTERIDAD
MSc. Sheila Serrano Vincenti EDITORA DE LA GRANJA
MSc. Jorge Cueva Estrada EDITOR DE RETOS
Dr. John Calle Sigüencia EDITOR DE INGENIUS
Dra. Floralba Aguilar Gordón EDITORA DE SOPHIA
Dra. Betty Rodas Soto EDITORA DE UTOPIA
Dra. Mónica Ruiz Vásquez EDITORA DEL NOTI-UPS
Dr. Jorge Altamirano Sánchez EDITORA REVISTA CÁTEDRA UNESCO
MSc. David Armendáriz González EDITOR WEB
Dr. Luis Álvarez Rodas EDITOR GENERAL

Consejo Técnico (Technical Board)

Dr. Ángel Torres-Toukourmidis (Técnico OJS)
Lda. Soledad Aguilar (Técnica Marcalyc)
Lda. Christian Arpi (Coordinador Community Managers)
Fís. Luis Gualco (Pasante)
Ing. Jessica Guamán (Pasante)

Servicio de Publicaciones (Publications Service)

Hernán Hermosa (Coordinación General)
Marco Gutiérrez (Soporte OJS)

Paulina Torres (Edición)

Raysa Andrade (Maquetación)
Martha Vinuesa (Maquetación)

Adriana Curiel (Traductor)

Editorial

Editorial Abya Yala (Quito-Ecuador)
Avenida 12 de octubre N-422 y Wilson
Bloque A, UPS Quito, Ecuador
Casilla 17-12-719
Teléfonos: (593-2) 3962800 ext. 2638
Correo electrónico: editorial@abyayala.org

Fotografía Portada (Cover photo)

Universidad Politécnica Salesiana,
Campus Sur. Vista aérea




Autor: César Iván Álvarez

LA GRANJA: REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

Volumen 34, Número 2, septiembre 2021 – febrero 2022

ISSN impreso 1390-3799 • ISSN electrónico 1390-8596

La administración de LA GRANJA se realiza a través de los siguientes parámetros:

- La revista utiliza el sistema antiplagio académico  **iThenticate**
Professional Plagiarism Prevention
- Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*) 
- El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System* 

Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*.

Los artículos de la presente edición pueden consultarse en <https://lagranja.ups.edu.ec/>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

LA GRANJA, está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información científica:

BASES DE DATOS INTERNACIONALES SELECTIVAS



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS



DIRECTORIOS SELECTIVOS



HEMEROTECAS SELECTIVAS



BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS



POLÍTICAS DE COPYRIGHT DE LAS EDITORIALES Y AUTOARCHIVO



OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS





Universidad
de Navarra

MUHLENBERG
COLLEGE

FRANKLIN & MARSHALL
COLLEGE



TYNDALE
• UNIVERSITY COLLEGE & SEMINARY •



THE UNIVERSITY of NORTH CAROLINA
GREENSBORO



UNC CHARLOTTE

LA GRANJA: REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

Consejo Internacional de Revisores (International Reviewers Board)

- Dra. María Custodio Villanueva, Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú
 Dra. Priscila dos Santos Silva, Universidad de Sao Paulo, Brasil
 Dr. José Ramiro Montaña, Universidad de León, México
 Dr. Juan Pablo Garzón Prado, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Ecuador
 Dr. Adán Guillermo Ramírez García, Universidad Autónoma Chapingo, México
 Dr. José Humberto Vera Rodríguez, Instituto Superior Tecnológico Enrique Noboa Arízaga, Ecuador
 Dra. Hebandreyna González, Universidad Nacional Experimental Sur del Lago “Jesús María Semprún”, Venezuela
 MSc. Valentina Santa Cruz, Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá-INCAP, Guatemala
 Dra. Paola Román, Universidad de Montpellier III, Francia
 Dr. Miguel García, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Colombia
 Dr. Xavier Zapata, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
 Msc. Katty Coral, Universidad Internacional SEK, Ecuador
 Dr. George Argota Pérez, Centro de Investigaciones Avanzadas y Formación Superior en Educación Salud y Medio Ambiente, Perú
 Dr. Jose Regalado, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, México
 Dr. Nelino Florida Rofner, Universidad Nacional Agraria de la Selva del Perú, Perú
 Dra. María Hinia Mardones, Universidad de Concepción, Chile
 Dr. Juan Eduardo Reategui Ordoñez, Universidad Católica Santa María, Perú
 Dr. Antonio Panico, Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, Italia
 Dr. Gustavo Daniel Gimenez, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina
 Dr. Sebastián Gonzalo Yáñez Segovia, Universidad Central del Ecuador, Ecuador
 Dr. Belisario Domínguez Mancera, Universidad Veracruzana, México
 Dra. Otilia Cordero, Universidad de Cuenca, Ecuador
 Dr. Julio Gabriel Ortega, Universidad Estatal Del Sur De Manabí, Ecuador
 Dr. Rudy Radrigán, Universidad de Concepción, Chile
 Dr. Antonio Pereira de Menezes Filho, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil
 Dr. Carlos Páez Pérez, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
 Dr. León Escobar, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
 Dra. Brigida Rodríguez, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador
 Dra. Mónica Sacido, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina
 Dr. José Bernardo Navarrete, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Ecuador
 Dra. Paola VitaFinzi, Università di Pavia, Italia
 Dr. Miguel Ángel García, Universidad de las Américas, Ecuador
 Dr. Izar Sinde, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Ecuador
 Dr. Sebastián Ramírez, Universidad del Valle, Colombia
 Dr. Christian Pilapanta, Universidad de Cuenca, Ecuador
 Dr. Jorge Alejandro García Zumalacarregui, Universidad de Cuenca, Ecuador
 Dr. Cristian Javier Patiño Vidal, Universidad de Santiago de Chile, Chile
 Dr. Nelino Florida Rofner, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú
 Dr. Héctor Vladimir Vásquez Pérez, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú
 Dr. Leonel Eduardo Huamán, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Perú
 Dr. Eduardo Chica, Universidad de Cuenca, Ecuador
 Dr. Paco Noriega, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
 Dr. José Luis Zambrano, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Ecuador

ÍNDICE

Editorial	6
Artículos Científicos	
NÚMERO ESPECIAL: CIENCIA GEOESPACIAL	
Análisis comparativo de cuatro plugins de QGIS para la creación de mapas web..... Lia Duarte, Catarina Queirós y Ana Cláudia Teodoro	8
Caracterización espectral y monitoreo de bosques de manglar con Teledetección en el litoral Pacífico colombiano: Bajo Baudó, Chocó Mauricio Alejandro Perea-Ardila, Julian Leal-Villamil y Fernando Oviedo-Barrero	27
Evaluación de información relacionada con combustibles en el Distrito Metropolitano de Quito para el modelado y simulación de incendios forestales, caso de estudio: Incendio del cerro Atacazo Juan Gabriel Mollocana Lara, César Iván Álvarez Mendoza y Luis Jonathan Jaramillo Coronel	45
ECOHIDROLOGÍA	
Interacciones entre índice de área foliar, densidad del dosel y precipitación efectiva de un bosque de <i>Polylepis Reticulata</i> ubicado en un ecosistema de páramo..... Amanda Suqui, Rolando Céleri, Patricio Crespo y Galo Carrillo-Rojas	63
DIETAS SOSTENIBLES	
Influencia de intervenciones educativas sobre nutrición y sostenibilidad en universitarios Ecuatorianos residentes en Honduras..... Jean Pierre Enriquez y Adriana Hernández-Santana	80
CIENCIAS AGRÍCOLAS	
Los grupos de acción y la aplicación de tecnología de alta productividad para maíz de secano en localidades del Plan Puebla, México José Regalado-López, Nicolás Pérez-Ramírez, Javier Ramírez-Juárez y José Arturo Méndez-Espinoza	91
SILVICULTURA	
Propagación sexual y asexual de <i>Brosimum Alicastrum</i> Swartz en Campeche, México Alberto Santillán-Fernández, Orlando Valentín Santiago-Santes, Ezequiel Espinosa-Grande, Zulema Guadalupe Huicab-Pech, Francisco Alfonso Larqué-Saavedra y Jaime Bautista-Ortega	105
ANALÍTICA DE CONTAMINANTES	
Revisión sobre límites máximos de cadmio en cacao (<i>Theobroma Cacao L.</i>) Nelino Florida Rofner	117
BIOTECNOLOGÍA	
Inducción <i>in vitro</i> de callos a partir de explantes foliares en rocoto (<i>Capsicum pubescens Ruiz & Pav.</i>)..... Angel David Hernández-Amasifuen, Alexis Argüelles-Curaca, Anthony Apolinario Cortez-Lázaro y Hermila Belba Díaz-Pillasca	131
DESARROLLO SUSTENTABLE	
Análisis sistémico de la sostenibilidad económica de unidades de producción agropecuaria familiar en una comunidad campesina de Lebrija, Colombia Martha Lenis Castro-Castro, Albeiro Beltrán-Díaz y Adolfo Vargas-Espítia	141
Normas para autores	154

Estimadas y estimados lectores:

Las ciencias geoespaciales han tenido una gran evolución durante los últimos años, entre sus máximos representantes están los sistemas de información geográfica (GIS), los sensores remotos en plataformas satelitales y no tripuladas o drones, así como los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS). Es así como en esta edición especial de La Granja queremos exaltar a estas ciencias con nuestro número de “Ciencias Geoespaciales”, el cual presenta algunas investigaciones que enmarcan el crecimiento de estas tecnologías en diferentes ramas.

De esta manera, empezamos este número con el campo de los Sistemas de Información Geográfica (GIS), donde la Dra. Lia Duarte y otros investigadores de la Universidad de Oporto en Portugal, presentan alternativas para comparar cuatro diferentes plugins y generar mapas web mediante la herramienta QGIS, buscando así nuevas oportunidades para la presentación de los resultados de la información geoespacial.

En el ámbito de las Ciencias Geoespaciales a nivel de Latinoamérica, el Dr. Mauricio Perea-Ardilla y otros investigadores del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico en Tumaco, en colaboración con la Universidad de Tolima en Colombia, realizan una interesante investigación utilizando sensores remotos satelitales para generar la caracterización espectral y monitoreo de bosques de manglar con teledetección en el litoral Pacífico colombiano, estableciendo una alternativa de planeamiento territorial en un ecosistema tan sensible como es el caso del manglar.

Asimismo, el Dr. Juan Gabriel Mollocana y su equipo de la Universidad Politécnica Salesiana, realizan la simulación de incendios en la ciudad de Quito, en Ecuador, mediante el uso de imágenes satelitales, proponiendo así diferentes opciones a la hora de gestionar los incendios forestales que tanto asechan a la capital ecuatoriana, e invitando

a que otras ciudades con características similares empiecen a utilizar y aprovechar esta información geoespacial.

Volviendo a las temáticas generales de La Granja, presentamos un artículo sobre la ecohidrología del páramo ecuatoriano, en donde se analizan las interacciones de variables climáticas con el desarrollo de las especies vegetales; este estudio realizado por investigadores de la Universidad de Cuenca, está liderado por la Dra. Amanda Suqui. Seguidamente, presentamos una investigación sobre tecnologías de ciencias agrícolas de alta efectividad en grupos de acción puntuales en las localidades de Puebla, en México, estudio liderado por el Dr. José Regalado López, desde el Colegio de Postgraduados en México.

A continuación, otra investigación desde México, pero ahora en el campo de la silvicultura, donde el Dr. Alberto Santillán-Fernández y su equipo multidisciplinario del Colegio de Postgraduados de Campeche, el Instituto Tecnológico Superior Veracruzano, y el Centro de Investigación Científica de Yucatán, nos presentan su estudio de la propagación sexual y asexual del *Brosimum alicastrum* Swartz.

Desde Perú, en el campo de la analítica de contaminantes, el Dr. Nelino Florida Rofner desde la Universidad Nacional Agraria de la Selva del Perú, nos presenta una revisión sobre los límites máximos de cadmio en plantaciones de Cacao. Mientras que, en el campo de la biotecnología, Ángel Hernández-Amasifuén y su equipo de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión del Perú, nos presentan un estudio de la introducción *in vitro* de callos de rocoto. Finalmente, desde la Universidad de Investigación y Desarrollo en Bucaramanga, Colombia, la Dra. Martha Castro-Castro y su equipo de investigadores nos presentan un análisis de la sostenibilidad económica de unidades de producción agropecuaria en comunidades campesinas.

Es así como se presenta este nuevo número de su Revista de Ciencias de la Vida, La Granja. Estamos seguros de que será una compilación de investigación útiles en el desarrollo de los distintos campos de la ciencia, y del quehacer científico regional y mundial.

Cordialmente,

MsC. Sheila Serrano Vincenti
Universidad Politécnica Salesiana
Editora en jefe

Dr. Ignacio de los Ríos Carmedano
Universidad Politécnica de Madrid
Editor en jefe

Dr. César Álvarez Mendoza
Universidad Politécnica Salesiana
Editor Invitado/Adjunto



ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO PLUGINS DE QGIS PARA LA CREACIÓN DE MAPAS WEB

COMPARATIVE ANALYSIS OF FOUR QGIS PLUGINS FOR WEB MAPS CREATION

Lia Duarte*, Catarina Queirós y Ana Cláudia Teodoro

*Departamento de Geociencias, Medio Ambiente y Ordenamiento territorial, Facultad de Ciencias. University of Porto, Portugal;
Institute of Earth Sciences, FCUP pole, Rua do Campo Alegre, Porto, Portugal*

*Autor para correspondencia: liaduarte@fc.up.pt

Manuscrito recibido el 28 de octubre de 2020. Aceptado, tras revisión, el 28 de marzo de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

QGIS es un software gratuito y de código abierto que permite visualizar, editar y analizar datos georreferenciados. Es un software de Sistema de Información Geográfica (SIG) compuesto por herramientas que permiten manipular la información geográfica y crear mapas que ayuden a obtener una mejor comprensión y organización de los datos geoespaciales. Desafortunadamente, los mapas que se crean directamente en el software de escritorio GIS no se pueden transferir automáticamente a un sitio web. Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo comparar las capacidades de publicación en complementos de QGIS, y crear mapas web. El estudio analiza cuatro plugins de QGIS (QGIS2Web, QGIS Cloud, GIS Cloud Publisher y Mappia Publisher), realizando una comparativa entre ellos, considerando sus ventajas y desventajas, los planes gratuitos y de suscripción, las herramientas que ofrece cada plugin y otros aspectos genéricos. Los cuatro complementos se probaron en un caso de estudio específico para obtener automáticamente los diferentes mapas web. Este estudio podría ayudar a los usuarios a elegir las herramientas más adecuadas para publicar mapas web en el software QGIS.

Palabras clave: QGIS Cloud, QGIS 2 Web, GIS Cloud Publisher; Mappia Publisher, WebSIG, WebMaps.

Abstract

QGIS is a free and open-source software that allows viewing, editing, and analyzing georeferenced data. It is a Geographic Information System (GIS) software composed by tools that allow to manipulate geographic information and

consequently to create maps which help to get a better understanding and organization of geospatial data. Unfortunately, maps created directly in the GIS desktop software are not automatically transferred to a website. This research aimed to compare publishing capabilities in different QGIS plugins to create Web Maps. This study analyzes four QGIS plugins (QGIS2Web, QGIS Cloud, GIS Cloud Publisher and Mappia Publisher), performing a comparison between them, considering their advantages and disadvantages, the free and subscription plans, the tools offered by each plugin and other generic aspects. The four plugins were tested in a specific case study to automatically obtain different Web Maps. This study could help users to choose the most adequate tools to publish Web Maps under QGIS software.

Keywords: QGIS Cloud, QGIS 2 Web, GIS Cloud Publisher; Mappia Publisher, WebGIS, WebMap.

Forma sugerida de citar: Duarte, L., Queirós, C. y Teodoro, A.C. (2021). Análisis comparativo de cuatro plugins de QGIS para la creación de mapas web. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 34(2):8-26. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.01>.

IDs Orcid:

Lia Duarte: <http://orcid.org/0000-0002-7537-6606>

Catarina Queirós: <http://orcid.org/0000-0002-2749-9679>

Ana Cláudia Teodoro: <http://orcid.org/0000-0002-8043-6431>

1 Introducción

El sistema de información geográfica (SIG) es un marco para la obtención, gestión y análisis de datos geoespaciales, y podría definirse como un conjunto de varios componentes como hardware, software, datos, metodologías y personas (operadores y usuarios), que hacen posible el análisis de datos geográficos por medio de la asociación de información de atributos a los objetos.

Los mapas de SIG podrían compartirse fácilmente, agregarse a las aplicaciones y estar accesibles virtualmente. Un mapa web no es sólo cartografía disponible vía web, sino que es un servicio mediante el cual los usuarios pueden elegir las características del mapa que se mostrará (Parker, May y Mitchell, 2013). Por lo tanto, un mapa web también es el contenido relacionado (base de datos) presentado vía web con una interfaz apropiada y una función determinada (por ejemplo, para consultas e informes). Una aplicación de mapa web no sólo hace referencia al código que se crea para definir la interfaz web, sino también a los elementos y a las funciones proporcionadas a través de la interfaz.

Los mapas web son interfaces con información geoespacial y constituyen las herramientas por medio de la cual los usuarios interactúan y exploran la información (Cartwright y col., 2001). Para que la información geográfica sea accesible a cualquier usuario, es necesario crear interfaces más simples. Para satisfacer esta necesidad y apoyar los principios cognitivos de uso de un usuario, los mapas Web deben estar compuestos por elementos como: herramientas de navegación, opciones de zoom, panorámica, movimiento, cambio de escala, entre otros (Cartwright y col., 2001). En los últimos años, el número de usuarios ha aumentado debido a las funciones desarrolladas por los creadores considerando: fácil acceso, diversidad y aplicaciones integradas más inteligentes, proporcionando un entorno más colaborativo (Veenendaal, Brovelli y Li, 2017). La mayoría de los mapas de GIS Web se crean utilizando software de código abierto (QGIS u otros) y patentado (por ejemplo, ArcGIS). Un ejemplo es el más reciente ArcGIS Online (ArcGIS, 2021). También se pueden utilizar otras plataformas como CartoDB, Mapbox, SimpleMappr, MangoMap, Click2Map, entre otros (<https://digital-geography.com/>

[create-maps-online-a-comparison-webmap-providers/](#)). Sin embargo, las plataformas referidas no son de uso gratuito, excepto singlemappr, que solo permite cargar información en un mapa web.

El desarrollo de un mapa web comprende cuatro pasos principales: i) la recopilación de los datos que se van a incluir en el mapa; ii) la conceptualización del mapa; iii) la planificación de la experiencia del usuario y iv) la elaboración del mapa web final.

Hay dos tipos de mapas web: (i) el mapa estático, donde el contenido del mapa es fijo y no se modifica, sin embargo, estos mapas se pueden generar dinámicamente cuando el servidor ejecuta un software que genera una imagen de mapa basada en condiciones cambiantes o en funciones específicas del usuario, y; ii) mapas web interactivos, donde los usuarios interactúan con el mapa. Para la representación de datos altamente dinámicos se pueden crear mapas en tiempo real; sin embargo, estos requieren una programación compleja y personalizada. Hossain y Meyer (2018) investigaron soluciones apropiadas y estables para representar los datos estadísticos en el mapa con algunas características especiales. Esta investigación también incluye la comparación entre diferentes soluciones para características específicas, y encontraron tres soluciones utilizando tres tecnologías diferentes, una de ellos es QGIS.

Los mapas web también presentan algunos retos en comparación con el software GIS, como: i) un mapa web GIS estático no es flexible y se debe realizar una edición cada vez que la información cambia, por lo que resulta ser muy lento; ii) mayores costos de hardware y software que requieren servidores y programas web más potentes y; iii) buena conexión a internet. Sin embargo, las ventajas superan las desventajas; por lo tanto, los mapas web son cada vez más usados en todo el mundo.

QGIS es un GIS de código abierto que considera las cuatro libertades de Stallman (Stallman, 2007), bajo una licencia GPL de GNU. Una de las principales ventajas de QGIS se basa en la facilidad y rapidez de desarrollar nuevos plugins, usando el lenguaje pitón (Teodoro y Duarte, 2013; Duarte y col., 2016; Duarte, Silva y Teodoro, 2018; Duarte y col., 2018; Duarte, Espinha y Teodoro, 2019). Actualmente hay varios plugins disponibles en

QGIS para la creación de mapas web, por ejemplo, QGIS Cloud (<https://qgiscloud.com/>); QGIS2Web (<https://plugins.qgis.org/plugins/qgis2web/>); Lizmap (<https://www.lizmap.com/en/>); GIS Cloud Publisher (<https://www.giscloud.com/apps/gis-cloud-publisher-for-qgis/>); GISQUICK (<http://gisquick.org/>); Mappia Publisher (https://plugins.qgis.org/plugins/mappia_publisher/) y NextGIS (<https://nextgis.com/>). En el año 2011 Sukic y Rančić (2011) analizaron los plugins de código abierto que han contribuido a la mejora de los SIG y la forma en cómo estos se utilizan. Desde ese momento se han venido realizando varias actualizaciones y mejoras.

La integración de los servicios de mapa web ha adquirido auge en las diferentes áreas de aplicación. Chen y Nguyen (2017) desarrollaron un marco para la integración de tecnologías de servicios de modelado de información de edificios (BIM) y mapa web para el análisis de localización y transporte en certificaciones de edificios verdes. Gharbi y Haddadi (2020) desarrollaron una aplicación GIS Mobile utilizando varias herramientas (PostgreSQL, PostGIS, QGIS, IntraMaps Roam, QGIS Cloud) con el objetivo de mejorar el método tradicional de obtención de datos de las carreteras, el conocimiento y la gestión de la red de carreteras en Argelia. Garnero y Vigna (2018) utilizaron QGIS2Web para ayudar a llevar a cabo las actividades de un consorcio forestal (Canavese Forestry Consortium), que planifica su trabajo en relación al territorio que gestiona. Bhatia y col. (2018) creó una aplicación web GIS usando herramientas de código abierto, donde se utilizaron Leaflet, Geoserver y PostgreSQL.

Se seleccionaron QGIS2Web, QGIS Cloud, GIS Cloud Publisher y Mappia Publisher para realizar un análisis comparativo entre ellos. El objetivo principal de este estudio es comparar estos plugins que permiten crear mapas web a través del software QGIS, QGIS2Web, QGIS Cloud, GIS Cloud Publisher y Mappia Publisher, considerando las ventajas y desventajas, funciones principales, planes de suscripción y las funciones generales. Se seleccionaron estos plugins ya que los plugins QGIS2Web y QGIS Cloud son los más descargados en el repositorio oficial de QGIS y los plugins GIS Cloud Publisher y Mappia Publisher son los más recientes, ambos creados en febrero de 2020. Los resultados obteni-

dos proporcionan un análisis comparativo que puede ayudar a los usuarios a entender el mejor plugin para ser usado en una condición específica.

2 Materiales y Métodos

Como ya se ha mencionado, este estudio analiza cuatro plugins QGIS (QGIS2Web, QGIS Cloud, GIS Cloud Publisher y Mappia Publisher), haciendo una comparación entre ellos, considerando sus ventajas y desventajas, los planes de suscripción, las herramientas ofrecidas por cada plugin y otros aspectos genéricos. A finales de 2020, el repositorio QGIS estuvo compuesto por 1302 plugins (<https://plugins.qgis.org/plugins/>). En esta lista, QGIS2Web cuenta con 649 717 descargas desde la primera versión lanzada en junio de 2015. El QGIS Cloud Plugin cuenta con 290 423 descargas desde la primera versión lanzada en agosto de 2012. El GIS Cloud Publisher se creó recientemente y cuenta con 4 462 descargas. Finalmente, el editor Mappia, también un plugin creado recientemente, tiene 10 692 descargas. Estas cifras datan de 20 de octubre de 2020.

Para todos los 4 plugins se requería un mapa base en la composición del mapa web. Todos los plugins vienen con esa función ya incorporada, excepto para QGIS2Web en el que se necesitó el plugin QuickMapServices (del software QGIS). Se utilizaron el Open Street Map (OSM) y las imágenes de satélite de Google Earth como mapas base. Los datos utilizados en estos cuatro plugins para probar los Mapas Web incluyen: i) shapefiles de dos puntos; ii) shapefiles de dos líneas; iii) shapefiles de dos polígonos y iv) archivos de dos ráster. También se registró el tiempo de procesamiento de cada mapa web.

2.1 Estudio de caso

Para comparar los cuatro plugins, se consideró un estudio de caso en Alentejo, Portugal, en la propiedad Herdade da Contenda (HC) (Figura 1). Se seleccionó el área de estudio de HC debido a la información geográfica disponible, datos vectoriales y ráster, que pueden usarse como información en los mapas web. HC es una zona protegida que está ubicada en el municipio de Moura, distrito de Beja, Portugal (Duarte y col., 2016).

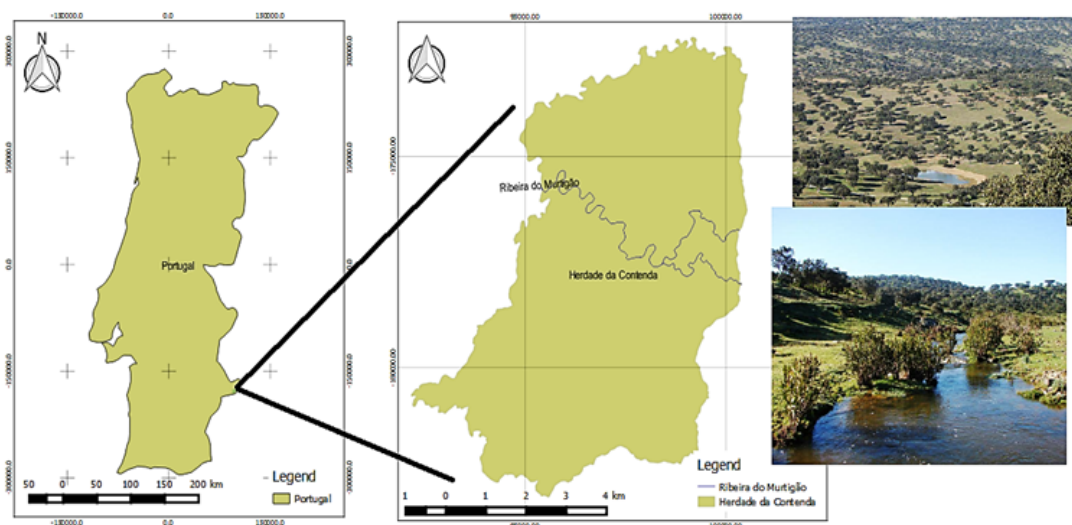


Figura 1. Área de estudio (adaptada de Duarte y col. (2016)).

La Tabla 1 presenta la información relativa al conjunto de datos utilizados en los mapas web creados. Esta información incluye el tipo de datos, la descripción de los datos, la resolución-escala y el origen.

Tabla 1. Área de estudio (adaptada de Duarte y col. (2016)).

Tipo de datos	Descripción	Resolución/Escala	Fuente
Vector – punto	Carnívoro en invierno	-	Obtenido en el campo
Vector – punto	Carnívoro en verano	-	Obtenido en el campo
Vector – línea	Líneas de contorno	10 m equidistancia	Generado a partir de DEM
Vector – línea	Ríos	1/100 000	DGT*(DGT - dgTerritório, 2015)
Vector – polígono	Mapa de la superficie del terreno 2007	1/100 000	DGT*(DGT - dgTerritório, 2015)
Vector – polígono	Mapa del suelo	1/ 35 000	ICNF***(ICNF, 2015)
Ráster	DEM	10 m	Obtenido del tramo
Ráster	Pendiente	10 m	Generado desde DEM

* DGT (*Direção Geral do Território*).

** ICNF (*Instituto da Conservação da Natureza e da Floresta*)

Toda la información utilizada se encuentra en el sistema europeo de coordenadas de referencia terrestre 1989 – Portugal Transverse Mercator 2006 (ETRS89 PTTM06; EPSG: 3763). Con el fin de introducir los datos en los mapas web, todos los temas se proyectaron a WGS84 (sistema Geodésico Mundial 1984) en el programa QGIS. Para cada plugin se evaluaron: i) las ventajas (documentación, biblio-

teca de código abierto, seguridad, conectividad, entre otros); ii) desventajas (el requisito de programas externos, la existencia de planes de suscripción, entre otros); iii) una comparación detallada entre los plugins considerando si hay planes gratuitos o planes de suscripción, al igual que el límite de los datos (cuando corresponda); iv) las herramientas de visualización y edición presentadas en cada plugin

(por ejemplo, zoom in, zoom out, herramientas de medida, coordinación, creación de mapas de calor, herramientas de gestión de datos, entre otros) y; v) una comparación detallada de las funciones generales, como la existencia de tutoriales, el acceso, el almacenamiento, la seguridad, la nube y la aplicación móvil, entre otras funciones.

2.2 QGIS2Web

QGIS2Web es el plugin más popular de QGIS para crear mapas web. QGIS2Web utiliza las bibliotecas de código abierto Leaflet, Mapbox y OpenLayers para almacenar los mapas web creados.

La biblioteca Leaflet es una biblioteca gratuita y de código abierto Javascript para construir mapas web. Se lanzó por primera vez en 2011, y soporta plataformas móviles y de escritorio con soporte para HTML5 y CSS3. Leaflet es la biblioteca más popular para mapas interactivos, y se utiliza junto con OpenLayers y la interfaz de programación de aplicaciones de Google Maps (API) en los sitios web conocidos como Foursquare, Pinterest, Flickr, entre otros (Leaflet for R, 2020). La biblioteca de Leaflet permite a los usuarios mostrar mapas web en mosaicos, alojados en un servidor público, y contiene documentación bien estructurada con varios tutoriales; además, soporta el formato GeoJSON. Sin embargo, también es compatible con otros formatos como CSV (texto conocido), WKT (texto conocido), TopoJSON, GPX (formato GPS eXchange; Geoapify (2020)).

El OpenLayers es una biblioteca libre y de código abierto de Javascript para mostrar datos de mapas como mosaicos en navegadores de Internet y mapas dinámicos. Fue lanzado por primera vez en 2006 y proporciona un API para construir mapas geográficos en Internet similares a Google Maps y Bing Maps (Google Maps, 2020; Bing Maps, 2021). La biblioteca OpenLayers ofrece más características que la biblioteca Leaflet, como por ejemplo las herramientas para el control de mapas. Sin embargo, requiere de mayor conocimiento para usar proyecciones y definir las coordenadas (formato LonLat; Leaflet (2020)). La documentación de OpenLayers contiene inicios rápidos, tutoriales y muchos ejemplos; y es compatible con GeoRSS, Keyhole Markup Language (KML), Geography Markup Language (GML), GeoJSON y datos de cualquier fuente que

utilice estándares de Open Geoespacial Consortium (OGC) como Web Map Services (WMS) o Web Feature Service (WFS). El control y la flexibilidad con la biblioteca resultan ser las principales ventajas de OpenLayers.

La biblioteca Mapbox fue lanzada en el 2010 por los mismos creadores de Leaflet, y permite crear mapas personalizados en línea para sitios web y aplicaciones como Foursquare, Lonely Planet, Facebook, entre otros (MapBox, 2020). Esta biblioteca representa un gran aporte a otras bibliotecas y aplicaciones de mapas web de código abierto, incluyendo la biblioteca Mapbox GL-JS Javascript, MBTiles, el IDE de TileMill, entre otros. Los datos se obtienen a través de fuentes de código abierto como OpenStreetMap y la Administración Nacional de Aeronáutica y del espacio (NASA) y de empresas privadas, como DigitalGlobe. Esta tecnología se basa en Node.js, Mapnik, Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) y Leaflet (MapBox, 2020). Contiene un kit de desarrollo de software (SDK), que está compuesto por un conjunto de herramientas, lo que permite a los desarrolladores crear nuevas aplicaciones. Es posible encontrar algunas similitudes entre las bibliotecas Mapbox y Leaflet. Sin embargo, MapBox proporciona más características, opciones de visualización de datos y mayor calidad en la creación de mapas vectoriales.

En este trabajo, se definieron las funciones de QGIS2Web en una interfaz gráfica de usuario (GUI) usando el software QGIS. A continuación, el mapa Web se exportó en el archivo GeoJSON, sin embargo, también se puede exportar a FTP (protocolo de transferencia de archivos), donde es posible publicar los mapas web directamente en la World Wide Web (WWW).

QGIS2Web exporta los archivos HTML, CSS y Javascript para la creación del sitio web a un archivo local, lo que permite abrir el mapa web en un navegador personal; sin embargo, se necesitaría un servidor para publicar el mapa. El mapa web solo se puede editar con el software QGIS. El QGIS2Web no presenta características adicionales en la página web, tales como la posibilidad de editar el mapa.

Estas funciones son similares en las tres bibliotecas (Leaflet, OpenLayers y Mapbox). Sin embargo, la biblioteca Mapbox contiene una biblioteca JS que

proporciona una página web para ayudar al usuario a obtener herramientas adicionales para la creación de mapas web. Este sitio permite al usuario crear

mapas web directamente y transferir el archivo a QGIS. La Figura 2 presenta un ejemplo de mapa web en el sitio web oficial de Mapbox.

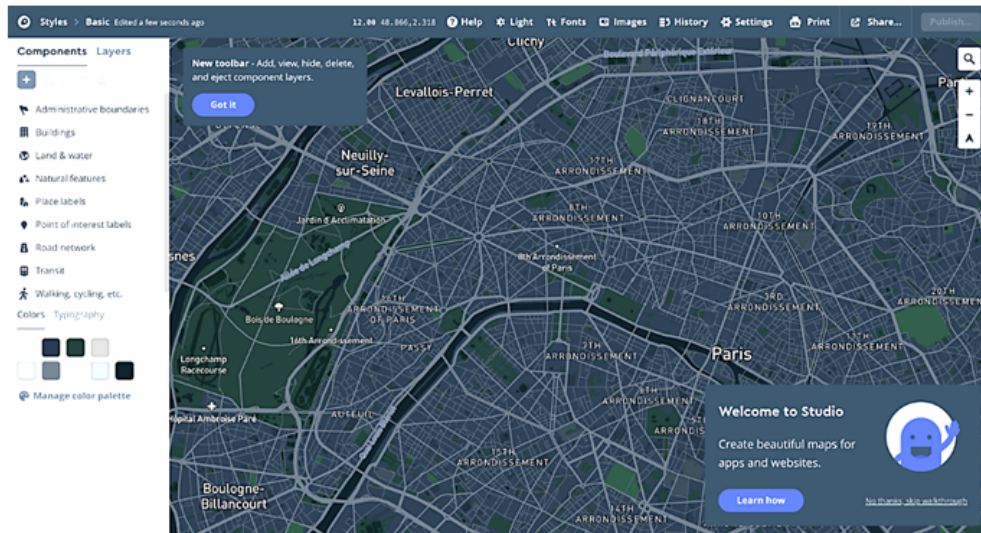


Figura 2. Mapa web en el sitio web oficial de Mapbox (fuente: <https://www.mapbox.com/>).

2.3 QGIS cloud

El QGIS cloud es una gran plataforma de GIS web para publicar mapas, datos y servicios en Internet. Este plugin no requiere un servidor o una infraestructura (QGIS Cloud, 2020), y proporciona una base de datos PostgreSQL 9 ampliada con PostGIS 2. El usuario puede modificar el almacenamiento de datos considerando cualquier herramienta compatible como pgAdmin3, el navegador QGIS o el QGIS DB-Manager. También es posible compartir mapas y datos en la página web compatible con OGC y mostrar mapas como WMS o descargar datos como WFS. Los usuarios pueden editar los datos directamente en la página web o utilizar el GIS web de QGIS Cloud y el mobile client integrados en el QGIS cloud con sub-cadenas bien formadas (WFS-T). También existe una función para proporcionar mapas para imprimir de alta calidad como WMS. Los datos también se pueden almacenar en la nube de PostgreSQL. El acceso a los datos está protegido mediante una contraseña y es posible acceder a ellos a través de Secure Shell (SSH). QGIS Cloud ofrece dos planes de suscripción: QGIS Cloud Free, donde se puede acceder libremente a todos los mapas publicados en Internet hasta 50 MB; y QGIS

Cloud Pro, donde el acceso a los mapas es limitado.

El sitio web de QGIS Cloud requiere la creación de la cuenta y la suscripción gratuita al plan. En el plugin QGIS Cloud (en el entorno QGIS) se crea una base de datos y se carga la información en ella. Por último, el mapa se publica con el botón "Publicar mapa". De igual forma, se puede elegir un mapa base, OSM, OpenTopoMap, OSM/ThunderForest, Wikipedia Maps o Bing Maps de esta GUI. El plugin ofrece 3 enlaces de publicación web y un correo electrónico de asistencia al cliente: un enlace a la página del mapa web, un enlace WMS público para servir imágenes HTTP, y un enlace al administrador de mapas, Map Admin. Por lo tanto, el usuario puede obtener un Mapa Web con acceso público a través del sitio web de QGIS Cloud.

2.4 GIS Cloud Publisher

GIS Cloud Publisher es un plugin de QGIS que permite cargar mapas con formato de mapa web a través del sitio web de GIS Cloud. Este crea una nube de datos para que cada usuario guarde sus mapas web, lo que hace que sea mucho más fácil

transferir y publicar datos GIS desde el ordenador personal a la nube. Este plugin representa una gran contribución a la comunidad de GIS, pues ayuda a los usuarios que necesitan un sistema rápido y accesible para compartir mapas o conjuntos de datos más complejos y hacer públicos esos datos. El mapa presentado en QGIS se replica instantáneamente en una página web en la cuenta de GIS Cloud y se comparte fácilmente a través de un enlace por medio de un sitio web (GIS Cloud, 2020).

El editor de GIS Cloud permite al usuario publicar sus mapas y datos de QGIS en el GIS cloud en tan solo segundos, preservando la simbología e integrando los datos de GIS con la nube. También es posible actualizar todos los cambios en el QGIS del usuario y sincronizarlo con los mapas publicados en el GIS cloud, a medida que el proyecto avanza.

De igual forma, este ofrece una gran variedad de planes de suscripción para diferentes tipos de funciones: planes gratuitos que ofrecen hasta 100MB por cuenta y la opción de ver los mapas en un smartphone; también hay planes extras de QGIS en caso que el usuario desee crear mapas a través del sitio web (GIS Cloud, 2020), y es gratis para QGIS y ArcGIS.

Adicionalmente se requiere una cuenta de sitio web. La GUI es muy intuitiva en el software QGIS, pues proporciona opciones con información paso a paso. Después de publicar el mapa, el GIS Cloud Publisher ofrece dos opciones de publicación: (i) abrir el mapa en GIS Cloud; (ii) proporcionar un enlace a otro usuario.

Este plugin brinda varias herramientas de edición, como por ejemplo crear, editar, agregar, compartir, exportar, duplicar, archivar o actualizar nuevos mapas importando tablas de excel y agregando marcadores; editar, agregar, clonar y unir archivos, aplicar un filtro espacial; se puede crear un búfer, se puede realizar una relación de proximidad de puntos o se puede crear un mapa de calor.

2.5 Mappia Publisher

Mappia Publisher es una plataforma de mapas web de código abierto que requiere una cuenta gratuita de GitHub para empezar a crear los mapas web. GitHub es una empresa con fines de lucro que pro-

porciona un servicio de alojamiento para repositorios Git (utilizado para el desarrollo de software) basado en una nube (GitHub, 2020).

El plugin configura automáticamente el mapa del usuario hacia el mapa web a través de GitHub. Es posible personalizar las interacciones en línea para mapas web creados a través de una interfaz gráfica amigable. También permite utilizar varios mapas web al mismo tiempo y no requiere ningún servidor. Es posible compartir mapas web o combinar mapas de diferentes fuentes, creando una plataforma interactiva en línea. A través de QGIS, Mappia Publisher crea mosaicos para mostrarlos en la página web con una variedad de niveles de zoom. GitHub ayuda a almacenar archivos de QGIS, metadatos, leyendas y otra información, y los datos almacenados en GitHub están completamente bajo el control del propietario de la cuenta; de igual forma, es posible publicar, eliminar y editar datos sin interferencias de Mappia Publisher (MappiaEarth, 2020).

El sitio web Mappia Publisher ofrece un servicio gratuito de mapas en línea (como WMS o WTS) junto con las ventajas de personalización. Para mostrar los mapas, la plataforma Mappia Publisher carga los mosaicos y los coloca en la posición geográfica correcta directamente en GitHub, lo que le permite trabajar incluso sin un servidor privado. El usuario puede compartir sus mapas de origen (GitHub tiene un límite de tamaño de mapa de 2GB), donde se controla mediante la opción "cargar mapas", y otros usuarios pueden descargarlos directamente desde la plataforma Mappia Publisher.

En el software QGIS, el mapa web se crea y exporta a un archivo público vinculado a GitHub. Después de exportar, Mappia Publisher abre automáticamente una página web con la publicación del mapa web.

2.6 Tiempos de procesamiento

Se registraron los tiempos de procesamiento (en segundos) de la creación de cada Mapa Web. Los procedimientos se realizaron en una computadora Intel® Core i5-4278U CPU -2,60 GHz, con memoria de 8,00 GB RAM, y un sistema operativo Windows 10 Home v.1903. Los tiempos fueron procesados bajo una conexión a Internet con las siguientes confi-

guras: 19 ms (Ping), 24,21 Mbps (descarga) y 20,69 Mbps (subida).

3 Resultados

Los mapas web se crearon a partir de cada plugin analizado. Las siguientes subsecciones presen-

3.1 QGIS2Web

Se crearon 3 mapas web basados en las bibliotecas Leaflet, OpenLayers y Mapbox (Figura 3) usando el plugin QGIS2Web.

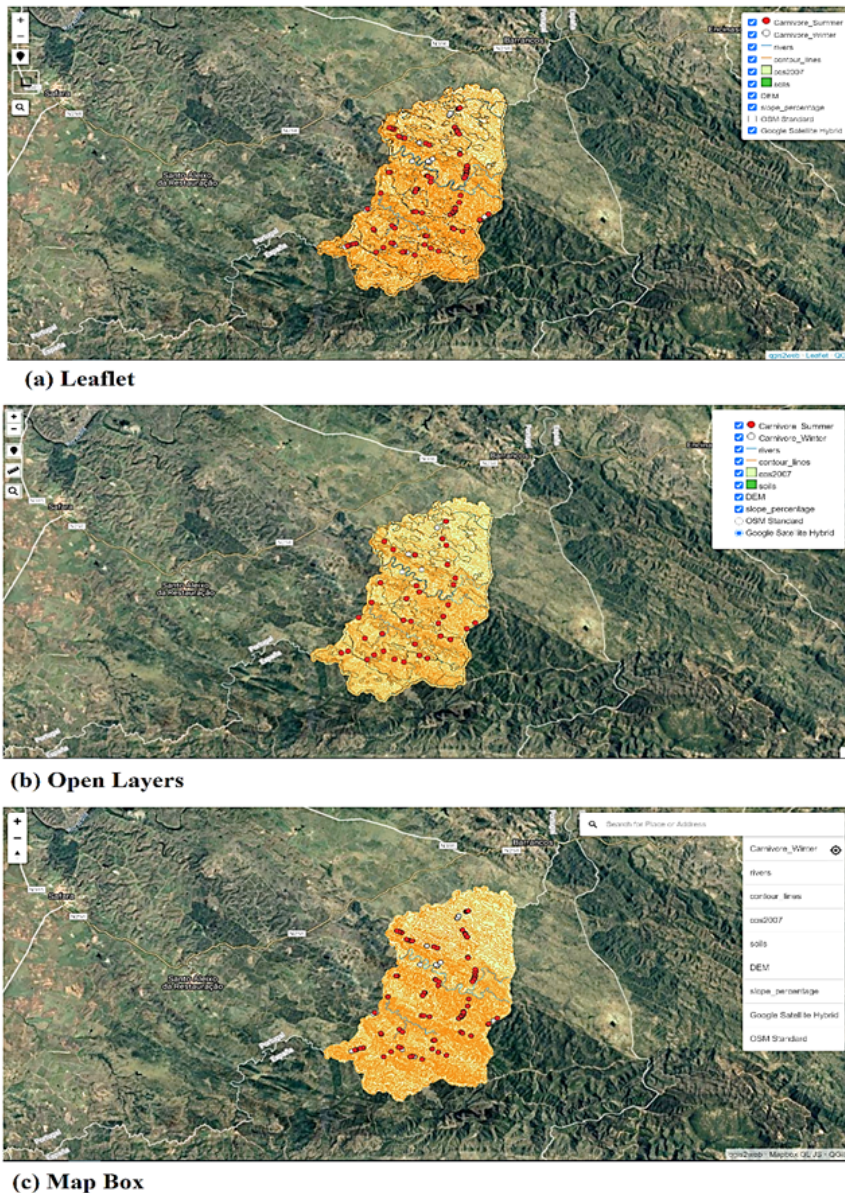


Figura 3. Mapas web QGIS2Web: A) Leaflet; b) OpenLayers; c) Mapbox.

En la figura 3 se puede observar que las GUI de los tres mapas web son muy similares, y están compuestas por las mismas herramientas, pero con diferentes widgets de la interfaz. Las ventanas emergentes de cada mapa web también tienen interfaces diferentes (Figura 4).

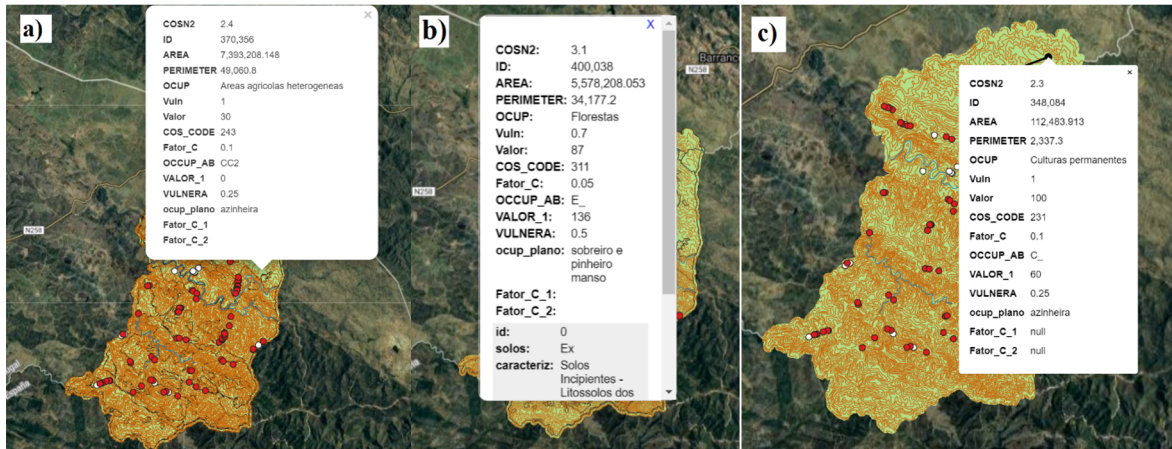


Figura 4. Pop-ups: A) Leaflet, b) OpenLayers y c) Mapbox.

El mapa web de QGIS Cloud se presenta en la Figura 5, y éste contiene las mismas funciones que QGIS2Web, pero también ofrece la posibilidad de ver y modificar la escala del mapa, el sistema de referencia y las coordenadas del mapa.

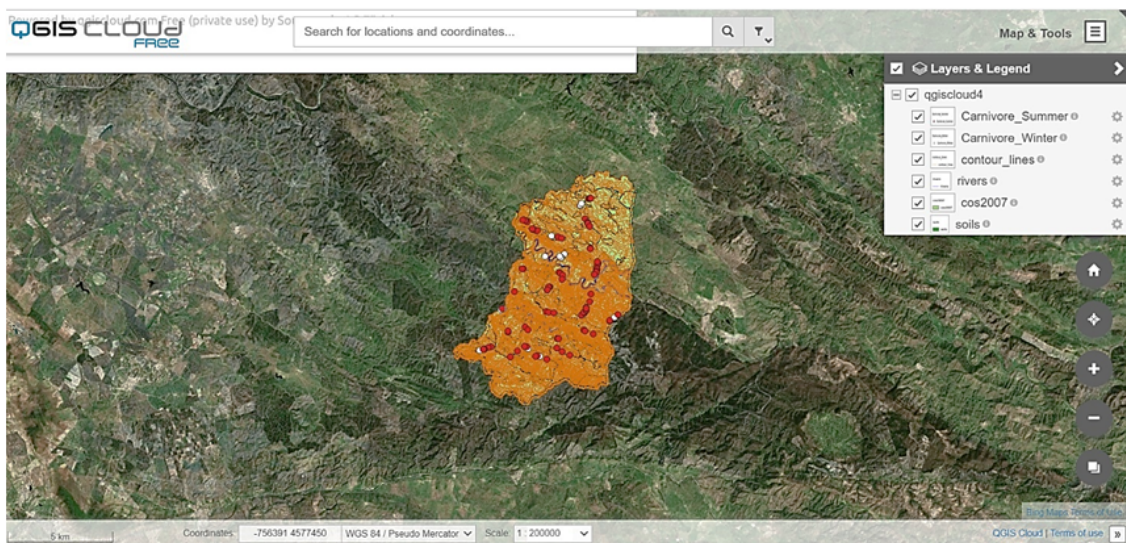


Figura 5. Mapa web de QGIS Cloud.

3.2 GIS Cloud Publisher

El mapa web de GIS Cloud Publisher ofrece funciones similares a las de otros mapas web, sin em-

bargo, proporciona menús y varias herramientas de edición (Figura 6).

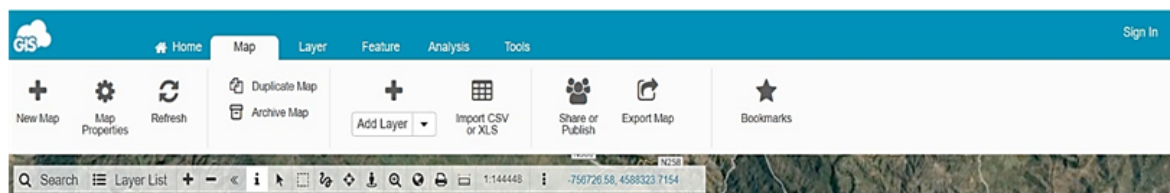


Figura 6. Funciones de mapas web de GIS Cloud Publisher.

En la figura 6 se puede observar que, más allá de las herramientas de visualización, éste proporciona más herramientas de edición (presentadas en los menús mapa, capa, análisis y herramientas, Figura 7). En el mapa hay más herramientas disponi-

bles como: (i) botón de información; (ii) herramienta para seleccionar; (iii) selección del área; (iv) selección a mano alzada; (v) mostrar Google Street View; (vi) ver todo el mapa; (vii) imprimir; (viii) escala; e (ix) ir a coordenadas (Figura 6).

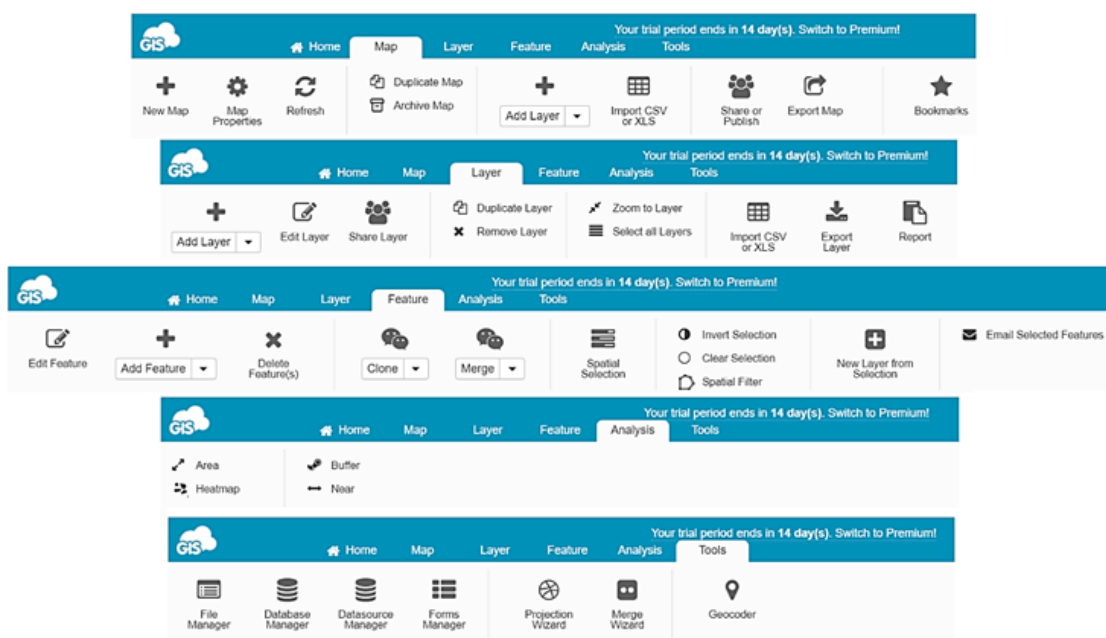


Figura 7. Funciones detalladas del mapa web de GIS Cloud Publisher.

3.3 Mappia Publisher

El mapa web de Mappia Publisher ofrece herramientas de visualización similares a las de otros ma-

pas web (Figura 8). Además, proporciona: i) herramientas de ayuda al usuario; ii) una herramienta para comprobar la información de una entidad; iii) una herramienta para visualizar metadatos; iv) la

función de habilitar y deshabilitar mensajes de advertencia; v) la función para ocultar ventanas de archivo de forma; y vi) la oportunidad de actualizar nuevas capas generadas en QGIS.

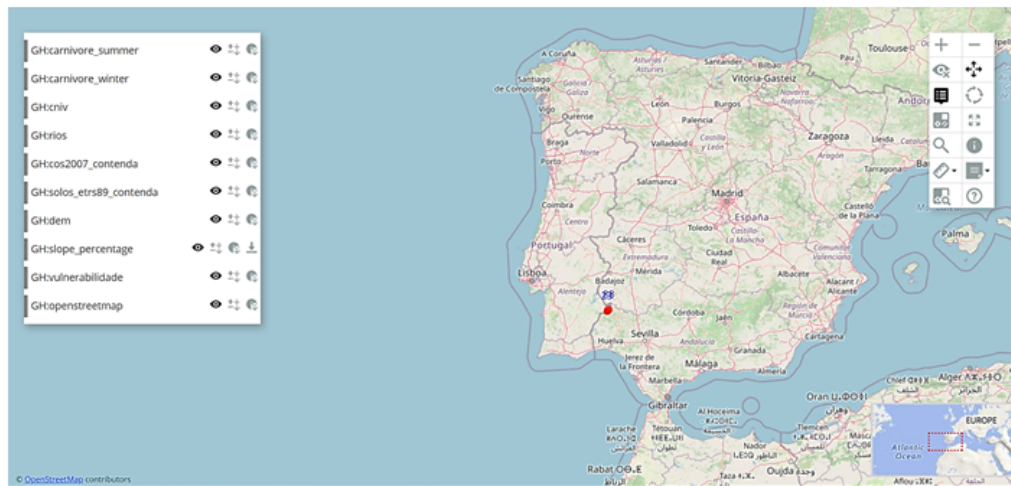


Figura 8. Mapa Web de Mappia Publisher.

Sin embargo, cuando se amplía la zona de estudio de casos, el Mapa Web no carga correctamente los datos (Figura 9), lo que puede implicar una gran limitante. Además, es el Mapa Web que requiere más tiempo para la creación.

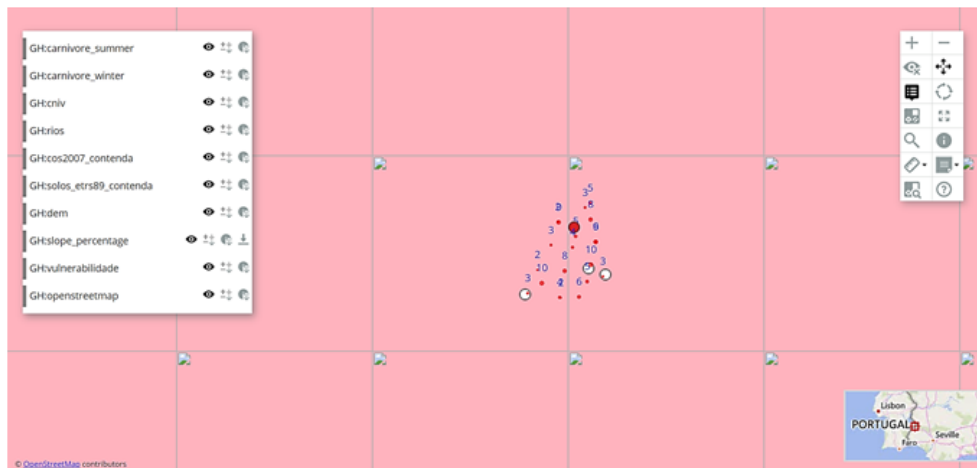


Figura 9. Función zoom in en el mapa web de Mappia Publisher.

La Tabla 2 presenta las ventajas y desventajas con respecto a las características más importantes de cada plugin. La Tabla 3 ofrece un análisis comparativo de los planes de cada plugin, y la Tabla 4 presenta un análisis comparativo de las herramientas de visualización y edición asociadas a cada plugin.

En la Tabla 2 se presentan las ventajas y desventajas de cada plugin, lo que permite evaluar la compatibilidad con las necesidades del usuario. Se verificó el tipo de lenguaje de programación que utiliza cada plugin, así como el tipo de archivo al que se puede exportar. Es posible observar las herramientas incorporadas en las páginas web para una mejor comprensión del mapa web. También permite evaluar el almacenamiento para cada plugin, y si está protegido por algún tipo de sistema de seguridad en el sitio web. De igual forma se puede comprobar si el plugin proporciona una página web a la que se puede acceder públicamente o si requiere programas externos para realizar esta función.

En la Tabla 3 se puede observar que los programas que ofrecen una función completa sin necesidad de planes de suscripción por parte del usuario (código abierto y gratuito) son QGIS2Web y Mappia Publisher, este último proporciona una página de vista previa del mapa web directamente desde el plugin, y QGIS2Web proporciona el código HTML para que el usuario pueda publicar en Internet. Los plugins que ofrecen un plan de código abierto pero limitados se definen en este trabajo como parcialmente libres, ya que se pueden utilizar de forma gratuita, pero con limitaciones en el uso de algunas funciones normalmente relacionadas con el almacenamiento, como QGIS Cloud y GIS Cloud Publisher.

En la Tabla 4 se puede observar que el GIS Cloud Publisher es el único plugin que proporciona herramientas de edición. En la Tabla 5 se presenta un resumen de este análisis comparativo. En la Tabla 5 se puede apreciar que el plugin GIS Cloud Publisher contiene casi todos los elementos evaluados, siendo el único plugin que permite insertar y usar herramientas de edición. Sin embargo, no es una fuente de código abierto, por lo que no es gratuita. De igual forma, la Tabla 5 permite comparar las características generales entre los cuatro plugins evaluados.

3.4 Tiempos de procesamiento

La Tabla 6 presenta el tiempo de procesamiento de los cuatro plugins analizados. En términos de tiem-

po de procesamiento, todos los plugins exportaron el mapa web casi instantáneamente; sin embargo, el plugin Mappia Publisher tardó casi 2 horas en exportarlo. El resto de los cambios realizados después de esa exportación fueron casi instantáneos.

4 Discusión

Las Tablas 2-5 comparan los cuatro plugins en varios aspectos: ventajas y desventajas; planes; herramientas de visualización y edición; y funciones generales. La información presentada en estas tablas ayudará a la toma de decisión del usuario que quiera crear un mapa web usando el software QGIS. En general, los cuatro plugins tienen varias ventajas en términos de acceso al proporcionar tutoriales y soporte en línea, y brindar un conjunto de herramientas de visualización. Algunos de estos plugins ofrecen acceso a los usuarios sin experiencia en QGIS. Esta característica es una ventaja para un usuario nuevo. Los cuatro plugins proporcionan tutoriales y videos de ayuda, al igual que herramientas de visualización. Sin embargo, solo GIS Cloud Publisher proporciona herramientas de visualización y edición en el mapa web. En términos de almacenamiento, cada plugin ofrece una variedad de almacenamiento de acuerdo con la función de cada uno. QGIS2Web brinda más almacenamiento que los demás.

Mappia Publisher ofrece 2GB de almacenamiento web; GIS Cloud Publisher hasta 100MB almacenamiento gratuito en la nube y puede llegar hasta 1GB si el usuario se suscribe al plan; QGIS Cloud hasta 50MB de almacenamiento gratuito en la nube y puede llegar hasta 1GB si el usuario se suscribe al plan. En términos de seguridad de datos, QGIS Cloud y GIS Cloud Publisher utilizan una conexión SSL segura. Estos plugins ofrecen al usuario seguridad adicional para que nadie pueda acceder a sus mapas web sin permiso. Mappia Publisher utiliza la seguridad proporcionada por la página GitHub y QGIS2Web no consta de ningún plan de seguridad.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los cuatro plugins

Plugins	Ventajas	Desventajas
QGIS2Web	<ul style="list-style-type: none"> - Es una biblioteca de código abierto. - Es compatible con HTML, CSS 3, GeoJSON, GeoRSS, KML, Node.js, Mapnik, GDAL. - Es una aplicación móvil (biblioteca Mapbox). - Tiene documentación de API. - Es simple para usuarios sin experiencia en QGIS. - Es el plugin de código abierto más utilizado por la comunidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere programas externos para la publicación del mapa web. - Requiere un mapa base. - Tiene pocas herramientas de edición de mapas web en la página web.
QGIS Cloud	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere infraestructura en línea. - Es una base de datos PostgreSQL ampliada con PostGIS2. - Tiene la posibilidad de compartir mapas con OGC o a través de WMS y descargarlos a través de WFS. - Imprime mapas de alta calidad (WMS). - Cuenta con seguridad SSL. - Tiene protección con contraseña. - No hay necesidad de programas externos para que el mapa web sea público. - Es simple para usuarios sin experiencia en QGIS. - Es una aplicación móvil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Errores momentáneos en el servidor del sitio web. - Solo ofrece la función completa con el plan de suscripción. - No funciona con el sistema MacOS. - Tiene almacenamiento de plan gratuito de solo 50 MB.
GIS Cloud Publisher	<ul style="list-style-type: none"> - Permite la creación de nubes. - Ofrece la posibilidad de transferir datos QGIS (vectores, rásters, WMS, WFS) y su simbología. - Admite puntos, líneas, polígonos, categorías y etiquetas. - Tiene la posibilidad de actualizar los cambios en el mapa. - Permite compartir mapas públicos (enlace URL). - Permite compartir mapas privados dentro de la nube de GIS. - La conexión con SSL es segura. - No hay necesidad de programas externos para que el mapa web sea público. - Es simple para usuarios sin experiencia en QGIS. - Es compatible con QGIS 3 y QGIS 2. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólo ofrece función completa con un plan de suscripción. - Cuenta con un almacenamiento de solo 100 MB de forma gratuita.
Mappia Publisher	<ul style="list-style-type: none"> - Tiene código abierto - Cuenta con almacenamiento de cuentas GitHub. - Tiene un límite de 2GB para los datos. - No requiere que los programas externos sean públicos. - Ofrece una página web para la visualización de mapas (con WMS o WTS). - Es simple para usuarios sin experiencia en QGIS. 	<ul style="list-style-type: none"> - El mapa web tarda demasiado en crearse. - Algunas fallas.

Tabla 3. Comparación de los cuatro plugins con respecto a los planes de suscripción.

Plugins	Planes gratuitos	Planes de suscripción
QGIS2Web	- Sólo tiene planes gratuitos.	- No aplica.
QGIS Cloud	- Plan gratuito con almacenamiento en la nube de 50 MB y una base de datos PostGIS 2.0.	- Ofrece mapas web con acceso limitado, soporte SSL, bases de datos PostGIS 2,0 con 500 MB/total, copias de seguridad diarias, herramienta de edición de mapas web en QGIS Cloud, nombres de dominio, logotipos y CSS personalizadas. -Plan adicional para aumentar el almacenamiento en la nube y 10 bases de datos adicionales.
GIS Cloud Publisher	- Ofrece un plan gratuito con 100 MB de almacenamiento en la nube y 10.000 vectores integrados dentro de los archivos vectoriales.	- El plan de GIS Cloud Publisher Premium/Map Editor ofrece: Mapas web privados, almacenamiento de hasta 1GB, 200.000 vectores integrados en archivos vectoriales y soporte premium. - El plan de vista de mapas ofrece: Mapas web privados, personalización de la marca y acceso a través de la aplicación del smartphone. - El plan del portal de mapas ofrece: Un dominio y una marca personalizada y acceso público a 50.000 vistas de mapas. - Colección de datos móviles ofrece: la posibilidad de publicar mapas web en una aplicación para smartphone. - Hay un plan para aumentar el almacenamiento en la nube de 500.000, 1.000.000, 2.500.000, 5.000.000, 7.500.000, 10.000.000, para vectores dentro de los archivos vectoriales. - Existe un plan para aumentar el almacenamiento a 10GB, 100GB y 1 TB, para rásteres y almacenamiento de archivos multimedia.
Mappia Publisher	- Sólo ofrece planes gratuitos.	- No aplica.

Tabla 4. Herramientas de visualización y edición para cada plugin.

Plugins		QGIS2Web	QGIS Cloud	GIS Cloud Publisher	Mappia Publisher
Zoom in/out		✓	✓	✓	✓
Geolocalización		✓	✓	✓	-
Medida de la distancia		✓	✓	✓	✓
Medida de las áreas		-	✓	✓	✓
Medida de la posición		-	✓	✓	-
Medida de las coordenadas de GMS		-	✓	-	-
Barra de búsqueda		✓	✓	✓	✓
Restablecer marcación al norte		✓	-	-	-
Capas de activación/desactivación		-	✓	✓	✓
Mapas de base On/Off	Herramientas de visualización	-	✓	✓	-
Agregar o quitar capa		-	-	✓	-
Actualizar capa		-	-	-	✓
Capa de recursos compartidos		-	-	-	✓
Capa duplicada		-	-	-	✓
Capa de exportación		-	-	-	✓
Realizar acercamiento a la capa		-	✓	✓	✓
Emergentes		✓	✓	✓	-
Ocultar ventanas emergentes		-	-	-	✓
Acercamiento de la selección por área		-	-	✓	✓
Modificar escala del mapa		-	✓	-	-
Información de proyección		-	✓	✓	-
Visualización del mapa de Google Street		-	-	✓	-
Imprimir		-	-	✓	-
Herramienta de ayuda		-	-	✓	✓
Leyenda del mapa web		-	✓	-	✓
Metadatos	Herramientas de edición	-	-	-	✓
interacciones de mapas on/off		-	-	-	✓
Guardar mapa web		-	-	✓	-
Añadir capas seleccionadas		-	-	✓	-
Eliminar capa		-	-	✓	-
Unir capas		-	-	✓	-
Selección/Invertir		-	-	✓	-
Filtro espacial		-	-	✓	-
Importar tablas de Excel		-	-	✓	-
Agregar marcadores		-	-	✓	-
Enviar por correo electrónico las capas seleccionadas		-	-	✓	-
Analizar áreas		-	-	✓	-
Analizar la memoria		-	-	✓	-
Relación de proximidad de puntos		-	-	✓	-
Mapas de calor		-	-	✓	-
Administración de archivos		-	-	✓	-
Base de datos		-	-	✓	-
Datos fuente		-	-	✓	-
Administración de formularios		-	-	✓	-
Asistencia de proyección y unión		-	-	✓	-
Geocodificador		-	-	✓	-

Tabla 5. Funciones generales de cada plugin.

Funciones generales	QGIS2Web	QGIS Cloud	GIS Cloud Publisher	Mappia Publisher
Opensource/ Completamente gratis	✓	-	-	✓
Opensource/ Parcialmente gratis	-	✓	✓	-
Tutoriales	✓	✓	✓	✓
Acceso	✓	✓	✓	✓
Almacenamiento	✓	✓	✓	✓
Independencia	-	✓	✓	✓
Competencia	-	✓	✓	-
Herramientas de visualización	✓	✓	✓	✓
Herramientas de edición	-	-	✓	-
Página Web adicional	-	✓	✓	✓
Seguridad SSL	-	✓	✓	-
Nube	-	✓	✓	-
Aplicación Móvil	-	✓	✓	-

Tabla 6. Tiempos de procesamiento (en segundos) para cada mapa Web.

Plugins	QGIS2Web			QGIS Cloud	GIS Cloud Publisher	Mappia Publisher
	Leaflet	OpenLayers	MapBox			
Tiempo de procesamiento(s)	5	5	5	25	52	7800

Los cuatro plugins funcionan dentro del software QGIS; sin embargo, hay algunos plugins que utilizan páginas web para brindar función adicional como QGIS Cloud, GIS Cloud Publisher y Mappia Publisher. Desafortunadamente, QGIS2Web no cuenta con una página web, por lo que requiere otro programa para publicar el mapa web en Internet. Este tipo de plugins facilita la conexión entre Internet y el software de QGIS, y ofrece una oportunidad para los nuevos usuarios de GIS. Los plugins atraen a una nueva audiencia para QGIS y ofrecen una visión amplia para todos los usuarios.

Aunque los plugins de QGIS para crear mapas web no pueden competir con plataformas como ArcGIS Online, que es una de las plataformas más utilizadas, pueden proporcionar una forma rápida y eficaz de mapeo colaborativo e implicar un gran

inicio para muchos usuarios de GIS. ArcGIS Online, que es parte de ESRI Geospatial Cloud (ArcGIS, 2021), es una plataforma que permite conectar a personas, ubicaciones y datos a través de mapas interactivos.

Según la información obtenida y presentada en las Tablas 2-5, se hacen las siguientes recomendaciones: i) ver la posibilidad de añadir herramientas de edición en QGIS2Web, QGIS Cloud y Mappia Publisher; ii) añadir una aplicación móvil a los plugins, pues es esencial para el acceso al Mapa Web a través de dispositivos móviles; iii) el plugin Mappia Publisher requiere más tiempo para procesar los datos y esto debe minimizarse, por lo que la optimización del código para procesar los datos también es crucial y; iv) los plugins que requieren programas externos son más difíciles de usar, por lo que

estos programas deben integrarse en los plugins.

Actualmente, los mapas web se crean y comparten con todas las personas, por lo que es importante aprender a crear mapas web e incluso saber usarlos. Los cuatro plugins probados en este estudio ofrecen varios tutoriales y soporte para sus usos. Por lo tanto, cualquier usuario principiante o avanzado puede aprender a usar estos plugins. El concepto de código abierto implica que un código puede ser actualizado en cualquier momento por cualquier persona, siendo una gran ventaja para las aplicaciones desarrolladas bajo software de código abierto y relacionadas con la creación de mapas web como parte de un proyecto colaborativo.

5 Conclusiones

Este trabajo compara cuatro plugins de QGIS considerando sus ventajas, desventajas, funciones, planes de suscripción y acceso para crear mapas web. La existencia de plugins bajo el software de código abierto GIS ofrece la posibilidad de automatizar los procedimientos sin necesidad de conocer el lenguaje de programación.

Los plugins elegidos para probar y comparar permite crear mapas web y pueden resultar muy útiles para usuarios sin experiencia en lenguaje de programación y poder crear desde cero un mapa web simple. Como QGIS proporciona varios plugins para realizar esos pasos, se probaron y compararon QGIS2Web, QGIS Cloud, GIS Cloud Publisher y Mappia Publisher, y se concluye que los cuatro plugins proporcionan herramientas de visualización. Sin embargo, GIS Cloud Publisher ofrece más herramientas de visualización que las demás y también brinda herramientas de edición.

En términos de planes de suscripción, sólo el QGIS2Web es totalmente gratuito, sin embargo, aloja los mapas web en el servidor local. De todas las ventajas y desventajas, incluso considerando el plan de suscripción, el GIS Cloud Publisher demostró ser el plugin más completo pues proporciona un conjunto de herramientas de visualización y edición para la creación de un mapa web.

Agradecimientos

El trabajo fue financiado por el proyecto UIDB/04683/2020 de la Fundación Portuguesa para la Ciencia y la Tecnología (FCT) - TIC (Instituto de Ciencias de la Tierra).

Referencias

- ArcGIS (2021). «ArcGIS». Accessed 9 January 2021. Online: <https://bit.ly/2PTjeLH>.
- Bhatia, T. y col. (2018). «Web GIS Development using Open Source Leaflet and Geoserver Toolkit». En: *Int. J. Comput. Sci. Technol* 9.3. Online: <https://bit.ly/3ej0Wgq>.
- Bing Maps (2021). «Bing Maps». Accessed 25 September 2020. Online: <https://binged.it/3h52216>.
- Cartwright, William y col. (2001). «Geospatial information visualization user interface issues». En: *Cartography and Geographic Information Science* 28.1, 45-60. Online: <https://bit.ly/3xJa5qh>.
- Chen, P. y Thanh C. Nguyen (2017). «Integrating web map service and building information modeling for location and transportation analysis in green building certification process». En: *Automation in Construction* 77, 52-66. Online: <https://bit.ly/3nPi8NL>.
- DGT - dgTerritório (2015). «Direção-Geral do Território». Accessed on 22 April 2015. Online: <https://bit.ly/3xOsp1d>.
- Duarte, L., J. Espinha y A. Teodoro (2019). «An Open Source GIS-Based Application for the Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution». En: *Environments* 6.7, 86. Online: <https://bit.ly/3xPTdxU>.
- Duarte, L., P. Silva y A. Teodoro (2018). «Development of a QGIS plugin to obtain parameters and elements of plantation trees and vineyards with aerial photographs». En: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7.3, 109. Online: <https://bit.ly/3toihZq>.
- Duarte, L. y col. (2016). «Assessing soil erosion risk using RUSLE through a GIS open source desktop and web application». En: *Environmental monitoring and assessment* 188.6, 351. Online: <https://bit.ly/33jGHji>.
- Duarte, L. y col. (2018). «QPhenoMetrics: An open source software application to assess vegetation phenology metrics». En: *Computers and Electro-*

- nics in Agriculture* 148, 82-94. Online: <https://bit.ly/3thbKQo>.
- GIS Cloud (2020). «Real-Time mapping». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3vNColk>.
- Garnero, G. e I. Vigna (2018). «GIS Instruments in Support of the Forestry Activities: A Case Study». En: *Journal of Agricultural Science and Technology B* 8, 388-395. Online: <https://bit.ly/2PTN179>.
- Geoapify (2020). «Leaflet vs OpenLayers. What to choose?». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3uot33n>.
- Gharbi, A. y S. Haddadi (2020). «Application of the mobile GIS for the improvement of the knowledge and the management of the road network». En: *Applied Geomatics* 12.1, 23-39. Online: <https://bit.ly/33mlH4x>.
- GitHub (2020). «Where the world builds software». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3eiDuzL>.
- Google Maps (2020). «Google Maps». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3nPGIDz>.
- Hossain, M. y H. Meyer (2018). «Concepts and Methods of Embedding Statistical Data into Maps». En: *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)* 8.5, 2250-3153. Online: <https://bit.ly/3nSRcfK>.
- ICNF (2015). «Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas». Accessed on 22 April 2015. Online: <https://bit.ly/3b4FTfE>.
- Leaflet for R (2020). «Leaflet for R». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3nQfSWp>.
- Leaflet (2020). «Leaflet, an open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3b8nsX8>.
- MapBox (2020). «Maps and location for developers». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3f0hTeq>.
- MappiaEarth (2020). «MappiaEarth». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3ejluW2>.
- Parker, C., A. May y V. Mitchell (2013). «The role of VGI and PGI in supporting outdoor activities». En: *Applied ergonomics* 44.6, 886-894. Online: <https://bit.ly/3h3CwW>.
- QGIS Cloud (2020). «QGIS Cloud». Accessed 25 september 2020. Online: <https://bit.ly/3h68PYc>.
- Stallman, P. (2007). «Why 'Open Source' misses the point of free software, GNU Operating System». Accessed February 2011. Online: <https://bit.ly/3ti9Oap>.
- Sukic, E. y D. Rančić (2011). «FOS GIS solutions in Web Mapping». En: *Technics Technologies Education Management* 6.4, 1083-1088. Online: <https://bit.ly/3enhIuU>.
- Teodoro, A. y L. Duarte (2013). «Forest fire risk maps: a GIS open source application—a case study in Norwest of Portugal». En: *International Journal of Geographical Information Science* 27.4, 699-720. Online: <https://bit.ly/3nYoRF1>.
- Veenendaal, B., M. Brovelli y S. Li (2017). «Review of web mapping: Eras, trends and directions». En: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6.10, 317. Online: <https://bit.ly/3xSKN91>.



CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL Y MONITOREO DE BOSQUES DE MANGLAR CON TELEDETECCIÓN EN EL LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO: BAJO BAUDÓ, CHOCÓ

SPECTRAL CHARACTERIZATION AND MONITORING OF MANGROVE FORESTS WITH REMOTE SENSING IN THE COLOMBIAN PACIFIC COAST: BAJO BAUDÓ, CHOCÓ

Mauricio Alejandro Perea-Ardila^{*1} , Julian Leal-Villamil²  y Fernando
Oviedo-Barrero¹ 

¹ Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico-CCCP, Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Capitanía de puerto de Tumaco, Tumaco, Colombia.

² Grupo Interdisciplinario de Investigación en Fruticultura Tropical. Universidad del Tolima, Barrio Santa Helena parte alta, Ibagué, Colombia.

*Autor para correspondencia: mapereaa@ut.edu.co

Manuscrito recibido el 25 de febrero de 2021. Aceptado, tras revisión, el 25 de mayo de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

El Pacífico colombiano posee extensas zonas en bosques de manglar (BM), que es un ecosistema estratégico de gran importancia ambiental y socioeconómica para la mitigación del cambio climático. Este trabajo tuvo por objetivo realizar la caracterización espectral y monitoreo de 66,59 km² para cuatro densidades de BM en el Bajo Baudó (Colombia), empleando tres imágenes Landsat (1998, 2014 y 2017), combinaciones de bandas espectrales y tres índices de vegetación (IV) (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada-NDVI, Índice de Vegetación Ajustado al Suelo-SAVI y el Índice combinado de reconocimiento de manglares-CMRI). Los resultados demostraron que la mejor combinación de bandas espectrales para la identificación visual de los BM correspondió a infrarrojo color (NIR, Rojo, Verde) y falso color compuesto 1 (NIR, SWIR, Rojo). La firma espectral de los BM tuvo diferentes comportamientos para las cuatro densidades bajo las condiciones de pleamar y bajamar. Durante los 19 años analizados, se registró una diferencia de hasta el 17,9 % en el valor promedio de la reflectancia en los BM. De igual manera, los valores de IV fueron proporcionales a las densidades de BM, pero su valor se notó reducido por efectos de la marea al momento de la captura de las imágenes; los mayores aumentos de IV se registraron sobre la zona costera de transición tierra-agua donde existe una fuerte interacción con la condición mareal. Esta investigación aporta a la caracterización y monitoreo espacial de BM con sensores remotos y el estudio espectral de este importante ecosistema en Colombia.

Palabras clave: Marea, firma espectral, índices de vegetación, Landsat, reflectancia.

Abstract

The Colombian Pacific has extensive areas in mangrove forests (MF), which is a strategic ecosystem of great environmental and socioeconomic for climate change mitigation. This work aimed to perform spectral characterization and monitoring of 66.59 km² for four MF densities in Bajo Baudó (Colombia), using three Landsat images (1998, 2014 and 2017), combinations of spectral bands and three vegetation indices (VI) (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI, Soil Adjusted Vegetation Index-SAVI and the Combined Mangrove Recognition Index-CMRI). The results showed that the best combination of spectral bands for visual identification of MF corresponded to infrared color (NIR, Red, Green) and false-color composite 1 (NIR, SWIR, Red). The spectral sign of MFs had different behaviors in four densities under the conditions of high tide and low tide. During the 19 years analyzed, there was a difference of up to 17.9% in the average reflectance value in MF. Similarly, the values of VI were proportional to the densities of MF, but their value was reduced by tidal effects at the time of capturing the images; the largest increases in VI were recorded over the coastal area of land-water transition, where there is a strong interaction with the tidal condition. This research contributes to the spatial characterization and monitoring of MF with remote sensors and the spectral study of this important ecosystem in Colombia.

Keywords: Tide, spectral signature, vegetation indexes, Landsat, reflectance.

Forma sugerida de citar: Perea-Ardila, M., Leal-Villamil, J. y Oviedo-Barrero, F. (2021). Caracterización espectral y monitoreo de bosques de manglar con Teledetección en el litoral Pacífico colombiano: Bajo Baudó, Chocó. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 34(2):27-44. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.02>.

IDs Orcid:

Mauricio Alejandro Perea-Ardila: <http://orcid.org/0000-0003-4561-0251>

Julian Leal-Villamil: <http://orcid.org/0000-0002-5100-2693>

Fernando Oviedo-Barrero: <http://orcid.org/0000-0001-5559-1504>

1 Introducción

Los bosques de manglar (BM) son ecosistemas de alta importancia en zonas costeras de países tropicales y subtropicales, y poseen una alta relevancia en temas de conservación ya que albergan gran cantidad de especies de flora y fauna, además son fuente de sustento vital y económico de comunidades rurales (FAO, 2007; Monirul, Helena y Lalit, 2018). Los manglares son clave en el ciclo del carbono y en acciones para la mitigación del cambio climático (Kuenzer y col., 2011; Giri, 2016; Pham y col., 2019). A pesar de los múltiples beneficios, los BM a nivel mundial son fuertemente degradados, debido principalmente a actividades agrícolas, de expansión urbana, desarrollo costero y fenómenos inducidos como el aumento del nivel del mar (Rhyma y col., 2020). Por lo tanto, se hace necesario llevar a cabo un monitoreo regular en los BM, que contribuya al estudio del ecosistema y funcione como herramienta de planificación para la preservación de los servicios ecosistémicos para generaciones futuras (FAO, 2007).

Los BM se localizan en zonas intermareales de difícil acceso y con condiciones ambientales variables que limita en gran medida aspectos logísticos para llevar a cabo un monitoreo periódico en campo (Zhang y col., 2017; Jia y col., 2019). En este sentido, la Teledetección es una valiosa herramienta para llevar a cabo el monitoreo de estos ecosistemas, ya que permite monitorear los BM a escalas regionales y locales (Giri, 2016; Muhsoni y col., 2018). Los BM se identifican fácilmente en las bandas infrarrojas debido a la cantidad de humedad en la vegetación (Purwanto y Asriningrum, 2019). Asimismo, estas características espectrales determinan la medición de la actividad fotosintética de los BM mediante el uso de índices de vegetación (IV) (Bannari y col., 1995; Rhyma y col., 2020).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) propuesto por Rouse, Haas y Deering (1974) es uno de los más empleados para el estudio de la vegetación a nivel mundial (Chuvienco, 2010). Este IV tiene como característica principal la relación entre las bandas infrarroja y roja, lo cual determina eficientemente las diferencias en la absorción de luz de las plantas (Asner, 1998). El NDVI ha sido ampliamente utilizado para el monitoreo de los BM y presenta una

fácil interpretación, ya que posee un rango de medición de -1 a +1, donde los valores positivos reflejan zonas con presencia de vegetación (Rhyma y col., 2020).

Por otra parte, el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, por sus siglas en inglés) (Huete, 1988) fue desarrollado para eliminar la influencia que tiene el suelo en la absorción de la reflectancia por la vegetación, este incluye el parámetro L el cual puede obtener valores entre 0 y 1 para eliminar el efecto del suelo, es decir, es un NDVI mejorado (Bannari y col., 1995). El Índice Combinado de Reconocimiento de Manglares (CMRI, por sus siglas en inglés) fue desarrollado por Gupta y col. (2018) para identificar exclusivamente BM, y tiene como característica principal la resta entre el NDVI y el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI, por sus siglas en inglés), facilitando el reconocimiento de los BM ya que incorpora el contenido de humedad de la vegetación. El CMRI posee un rango de medición entre -2 y +2, donde los valores positivos representan zonas con presencia de BM. El uso de parámetros espectrales y el desarrollo específico de los IV ha permitido grandes avances en la obtención de información cuantitativa y cualitativa necesaria para la caracterización de BM en diferentes zonas (Conti, Sampaio y Cunha, 2016).

Diferentes estudios a nivel mundial han incorporado el uso de imágenes de sensores remotos y técnicas de teledetección para el monitoreo de manglares; tal es el caso de Rebelo-Mochel y Ponzoni (2007) quienes utilizaron imágenes Landsat 5 TM y datos de campo para caracterizar espectralmente cuatro especies en BM de la Bahía de Turiau al noreste de Brasil. Asimismo, Omar, Misman y Linggok (2018) emplearon imágenes Landsat para la caracterización de la firma espectral e implementaron el uso de IV para monitorear los cambios ocurridos en los BM de Malasia para tres fechas (1990, 2000 y 2017). De igual manera, Ávila y col. (2020) determinaron la variación espacio-temporal de los BM en Cuba utilizando datos Landsat para un periodo de 35 años (1984 - 2019) e implementaron dos IV (NDVI y EVI) en su monitoreo para fines de conservación. Umroh y Sari (2016) utilizaron combinaciones de falso color en imágenes Landsat y el NDVI para monitorear las diferentes densidades de BM en la isla de Pongok en Indonesia. Por su parte, Rhyma y col. (2020) utilizaron el NDVI y diferentes valores

de ajuste del parámetro L en el índice SAVI para el monitoreo de BM, usando imágenes de mediana resolución espacial en la reserva de Matang en Malasia. Por su parte, Chen (2020) implementó el uso del CMRI y el NDVI para el monitoreo de los BM en Dongzhaigang (China) con imágenes satelitales de mediana resolución.

A nivel regional, Galeano y col. (2017) usaron imágenes de sensores remotos de alta resolución incorporando el NDVI y factores climáticos en el monitoreo de BM en las islas del Rosario, en el Caribe colombiano. Asimismo, Perea-Ardila, Oviedo-Barrero y Leal-Villamil (2019) realizaron un mapeo de BM densos en el municipio de Buenaventura sobre la zona central del Pacífico colombiano y detallaron algunas características espectrales básicas de este ecosistema usando imágenes Sentinel 2. Los estudios mencionados anteriormente resaltan la importancia del uso de la teledetección para la caracterización del monitoreo de BM a diferentes escalas y con diferentes enfoques metodológicos.

Colombia, a lo largo del litoral Pacífico, posee aproximadamente 2094,03 km² de manglares (Rodríguez-Rodríguez y col., 2016) extensión que puede corresponder entre el 70 y 80% del total de BM del país (Wilkie y Fortuna, 2003). Este ecosistema requiere de monitoreo constante, ya que en términos de conservación brinda múltiples servicios ecosistémicos y es considerado como un ecosiste-

ma altamente amenazado por el cambio climático (Chow, 2017). El presente trabajo tiene como objetivo el uso de técnicas de teledetección y la aplicación de tres índices de vegetación (NDVI, SAVI, CMRI) para caracterizar espectralmente y monitorear cuatro densidades de BM, utilizando imágenes Landsat de tres años (1998, 2014 y 2017) en diferentes estados mareales en el Bajo Baudó-Chocoano. Con los resultados obtenidos en esta investigación se avanzará en el estudio espectral y monitoreo espacial de BM con imágenes Landsat en ecosistemas costeros estratégicos de Colombia.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

La zona de estudio se localizó al norte del Pacífico colombiano, sobre la zona costera del municipio de Bajo Baudó, departamento del Chocó (Figura 1). El área de acuerdo con la clasificación de zonas de vida establecida por Holdridge (1978) corresponde a un Bosque Muy Húmedo Tropical (bmhT). La precipitación anual oscila entre los 4000 y 7000 mm de lluvia y presenta una temperatura promedio anual superior a 24°C (Blanco, Escobar-Sierra y Carvajal-Quintero, 2014). Las geoformas del terreno y las condiciones climáticas del área propician que los BM se encuentren mayormente de forma continua sobre la costa y presenten alturas superiores a los 40 m (Rodríguez-Rodríguez y col., 2016).

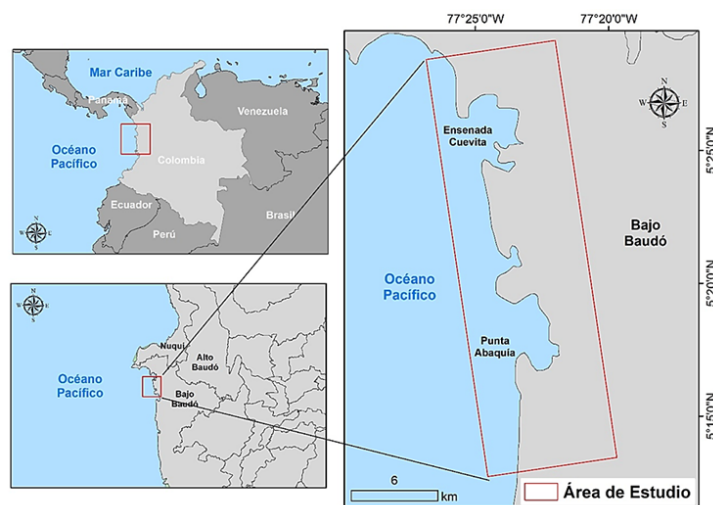


Figura 1. Localización del área de estudio.

El flujograma utilizado en esta investigación se presenta en la Figura 2, y dentro de los procesos utilizados se contempló (i) el procesamiento digital de imágenes Landsat, (ii) el análisis espectral de bosques de manglar por medio de la firma espectral y

(iii) el cálculo de índices de vegetación para las diferentes densidades de manglares. De igual manera, el manejo de datos geospaciales y análisis de las imágenes Landsat se realizó con el software ArcGIS 10,3 (ESRI 2014).

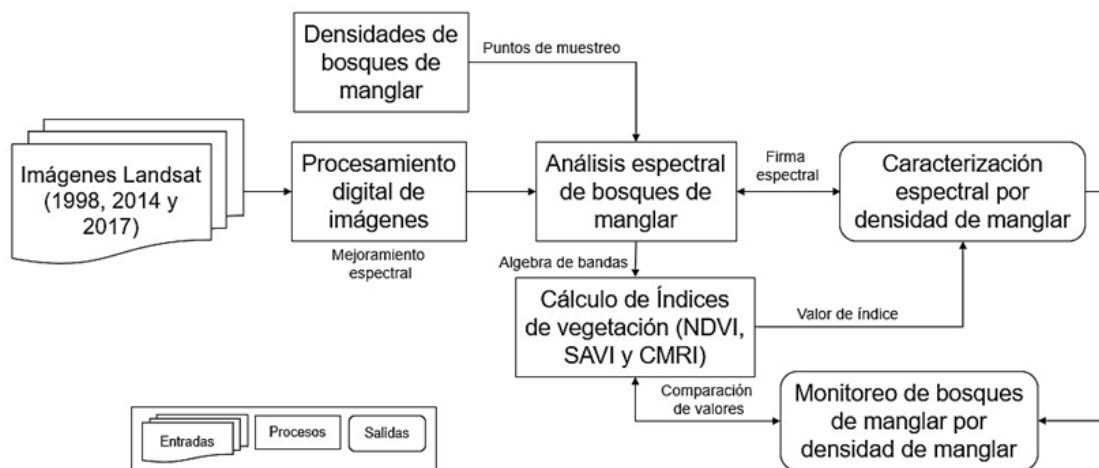


Figura 2. Flujograma utilizado.

2.2 Imágenes de sensores remotos

Se utilizaron tres imágenes Landsat con resolución espacial de 30 m correspondientes a los años 1998, 2014 y 2017 (USGS, 1998; USGS, 2014; USGS, 2017), estas imágenes fueron descargadas libremente a través del portal oficial del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) <https://earthexplorer.usgs.gov/> (USGS, 2020). La selección de las imágenes correspondió a productos que no presentaron afectación por nubes, ya que esta zona permanece con una alta nubosidad durante la mayor parte del año (Tabla 1).

La información de las condiciones mareales se identificó con base a los datos de la RedMPOMM (Red de Monitoreo de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina) de Colombia, de la Dirección General Marítima (<https://geohub-dimar.opendata.arcgis.com/>) (Dirección General Marítima., 2020). En este paso se identificó la fecha y hora de captura de la imagen Landsat y se validó con respecto a las condiciones de la marea registradas para ese momento.

2.3 Preprocesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes se sometieron a un preprocesamiento, y se transformaron sus Niveles Digitales (ND) a unidades físicas (reflectancia al tope de la atmosfera-ToA) empleando los parámetros para la normalización de la reflectancia establecidos por Ariza (2013) y USGS (2018b) para las imágenes Landsat 8 y los de Chander y Markham (2003) y USGS (2018a) para las imágenes Landsat 5 y 7, respectivamente (Tabla 2). De igual forma, se realizó el recorte de las imágenes conforme el área de estudio, y posteriormente se efectuó la fusión de bandas para su respectivo análisis.

2.4 Definición de las densidades de bosques de manglar

Se utilizó información vectorizada del año 2019 correspondiente a la densidad de BM del a escala 1:2000 elaborada por el Centro de investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico-CCCP (DIMAR-CCCP, 2013). Esta cartografía se realizó bajo técnicas de interpretación visual de imágenes

utilizando ortofotos de muy alta resolución espacial y datos de Light Detection and Ranging (LIDAR, por sus siglas en inglés) que posee la caracterización espacial de los diferentes BM frente a su densidad y altura, lo que permitió establecer cuatro categorías de densidad que correspondieron a: Manglares

Denso Alto (MDA), Manglar Abierto Alto (MAA), Manglar Denso Bajo (MDB) y Manglar Abierto Bajo (MAB). Con esta capa se realizó una máscara donde se definieron los límites de la cobertura de manglar en las imágenes Landsat y se determinaron sus correspondientes densidades.

Tabla 1. Características de las imágenes Landsat empleadas.

Característica	Landsat 5 TM	Landsat 8 OLI	Landsat 7 ETM+
ID Producto	LT50100561998003CPE00	LC80100562014239LGN01	LE70100562017111EDC00
Fecha de captura	03/01/98	27/08/14	21/05/17
Columna/Fila		010 - 056	
Cobertura de nubes	16,00 %	18,53 %	21,00 %
Ángulo solar	46,62°	63,51°	64,39°
Resolución radiométrica	8 Bits	12 Bits	8 Bits
Longitud de onda	Banda 1 - Azul (0,45-0,52)	Banda 2 - Azul (0,45-0,51)	Banda 1 - Azul (0,45-0,52)
	Banda 2 - Verde (0,52-0,60)	Banda 3 - Verde (0,53-0,59)	Banda 2 - Verde (0,52-0,60)
	Banda 3 - Roja (0,63-0,69)	Banda 4 - Roja (0,64-0,67)	Banda 3 - Roja (0,63-0,69)
	Banda 4 - NIR (0,77-0,90)	Banda 5 - NIR (0,85-0,88)	Banda 4 - NIR (0,77-0,90)
	Banda 5 - SWIR1 (1,55-1.75)	Banda 6 - SWIR1 (1,57-1.65)	Banda 5 - SWIR1 (1,55-1.75)
Estado de marea	Desconocido	Pleamar	Bajamar
Proyección		UTM zona 18	

Basada en el metadato de las imágenes y registros de marea de la RedMPOMM.

2.5 Análisis espectral de bosques de manglar

Para observar el comportamiento de los BM en las diferentes longitudes de onda, se utilizaron 4 combinaciones de bandas descritas por Horning (2014) y Franco (2017), las cuales fueron: color verdadero (Rojo, Verde, Azul), infrarrojo color (NIR, Rojo, Verde) y falso color compuesto 1 (NIR, SWIR, Rojo) y falso color compuesto 2 (SWIR, NIR, Rojo). Para cada imagen se digitalizaron polígonos para el enmascaramiento de las nubes con el fin de evitar la influencia de las nubes y sombras en análisis espectral de los BM (Zhu y Woodcock, 2014; Pimple y col., 2018). De acuerdo con las recomendaciones de muestreo estadístico para análisis espectrales brindadas por Congalton (1991), se estableció al azar 200 puntos de muestreo distribuidos equitativamente entre las diferentes densidades de BM (50 para cada densidad establecida), se establecieron los valores de reflectancia ToA promedio para

cada imagen y se registraron las firmas espectrales correspondientes en el periodo de tiempo evaluado.

2.6 Cálculo de Índices de vegetación

Para efectuar el monitoreo de los BM en el periodo de tiempo seleccionado, se utilizaron los tres IV descritos en la Tabla 3.

2.7 Monitoreo de bosques de manglar con índices de vegetación

Se realizó una comparación entre los valores de IV, teniendo en cuenta como referencia las densidades de BM para 1998-2014, 2014-2017 y 1998-2017 y se identificó la variación del valor de IV para cada densidad; se efectuaron las comparaciones gráficas entre el valor IV y la densidad del BM, donde se determinó el comportamiento para cada periodo de tiempo estudiado.

Tabla 2. Parámetros para la calibración de las imágenes Landsat.

Sensor	Ecuación
Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+	$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda}$ $\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s}$
	<p>Dónde:</p> <p>L_{λ}: Radiación espectral en la apertura del sensor [$W/(m^2 sr \mu m)$].</p> <p>Q_{cal}: Valor de píxel calibrado cuantificado [DN].</p> <p>Q_{calmin}: Valor mínimo cuantificado del píxel calibrado [DN].</p> <p>Q_{calmax}: Valor máximo cuantificado del píxel calibrado [DN].</p> <p>$LMIN_{\lambda}$: Radiancia espectral en el sensor que se escala a Q_{calmin} [$W/(m^2 sr \mu m)$].</p> <p>$LMAX_{\lambda}$: Radiancia espectral en el sensor que se escala a Q_{calmax} [$W/(m^2 sr \mu m)$].</p> <p>ρ_{λ}: Reflectancia planetaria del ToA.</p> <p>d: Distancia Tierra-Sol [unidades astronómicas].</p> <p>$ESUN_{\lambda}$: Irradiancia solar media exoatmosférica [$W/(m^2)$].</p> <p>θ_s: Ángulo cenital solar.</p>
Landsat 8 OLI	$\rho'_{\lambda} = \frac{M_p Q_{cal} + A_p}{\sin \theta_{se}}$
	<p>Dónde:</p> <p>ρ'_{λ}: Reflectancia planetaria en el techo de la atmosfera ToA.</p> <p>M_p: factor multiplicativo de escalado específico.</p> <p>Q_{cal}: Valor de píxel calibrado cuantificado.</p> <p>A_p: Factor aditivo de escalado específico.</p> <p>θ_{se}: Ángulo de elevación solar del centro de la escena.</p>

Tabla 3. Descripción de los índices de vegetación e índice de agua empleados en este estudio.

Índice	Ecuación	Referencia
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Rouse, Haas y Deering (1974)
Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} (1 + L)$	Huete (1988)
Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)*	$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	Gao (1996)
Índice Combinado de Reconocimiento de Manglares (CMRI)	NDVI-NDWI	Gupta y col. (2018)

Donde: L=0,5. *El NDWI solo se utilizó para determinar el CMRI.

3 Resultados

3.1 Preprocesamiento de imágenes satelitales

Los ND de las imágenes se transformaron a valores de reflectancia ToA (Tabla 4), lo que permitió obtener una mejora radiométrica eliminando en gran medida los efectos atmosféricos presentes en los productos originales. Asimismo, se efectuó el recorte de las imágenes al área de estudio y se enmascararon las nubes presentes en el área de estudio.

3.2 Densidad de bosques de manglar



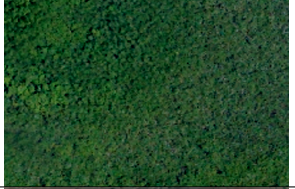

De acuerdo con la información digital descrita en DIMAR-CCCP (2013), se realizó el análisis de la distribución espacial y densidad de los BM en el área de estudio, y se encontró una extensión total de BM de 66,59 Km², siendo la densidad de Manglar Denso Alto (MDA) la más predominante en la zona, mientras que el Manglar Abierto Bajo presentó la menor extensión en el sitio de estudio (Tabla 5).

Tabla 4. Resumen estadístico de los valores de reflectancia obtenidos a partir de las imágenes Landsat.

Parámetros	Imagen Landsat empleada														
	Landsat TM (1998)					Landsat OLI (2014)					Landsat ETM+ (2017)				
	B1	B2	B3	B4	B5	B2	B3	B4	B5	B6	B1	B2	B3	B4	B5
Min	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,07	0,04	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00
Max	0,44	0,89	0,76	0,95	0,63	0,75	0,75	0,79	0,90	0,59	0,34	0,38	0,35	0,80	0,50
Prom	0,03	0,05	0,03	0,17	0,07	0,10	0,08	0,06	0,20	0,09	0,03	0,04	0,03	0,32	0,13
Std	0,03	0,05	0,03	0,14	0,05	0,04	0,04	0,05	0,15	0,06	0,03	0,03	0,03	0,19	0,07

Donde B1 (Banda 1), B2 (Banda 2), B3 (Banda 3), B4 (Banda 4), B5 (Banda 5), Mínimo (Min), Máximo (Max) y Promedio (Prom).

Tabla 5. Densidad de bosques de manglares presentes en el área de estudio.

Densidad de manglar	Descripción	Área (Km2)	Extensión (%)	Detalle
Manglar Denso Alto (MDA)	Manglares con alturas superiores a los 15 m cuya densidad representa más del 70 % de cobertura en su unidad.	53,60	80,49	
Manglar Abierto Alto (MAA)	Manglares con alturas superiores a los 15 m cuya densidad representa entre el 30 y 70 % de cobertura en su unidad.	9,28	13,94	
Manglar Denso Bajo (MDB)	Manglares con alturas inferiores a los 15 m cuya densidad representa más del 70 % de cobertura en su unidad.	3,18	4,78	
Manglar Abierto Bajo (MAB)	Manglar con alturas inferiores a los 15 m cuya densidad representa entre el 30 y 70 % de cobertura en su unidad.	0,53	0,8	
TOTAL		66,59	100.00 %	

3.3 Análisis espectral de bosques de manglar

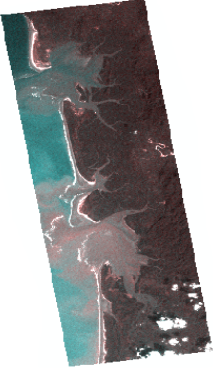
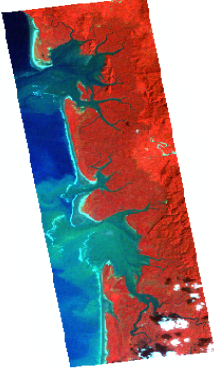
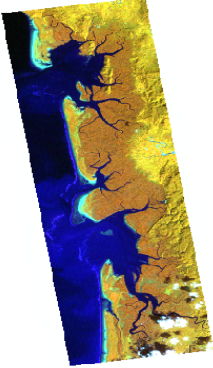
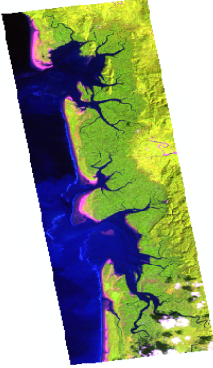

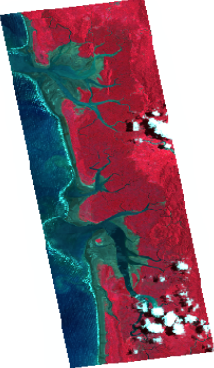
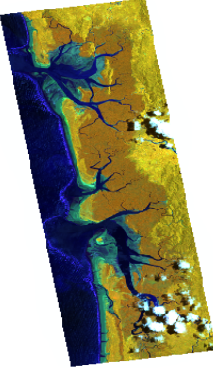
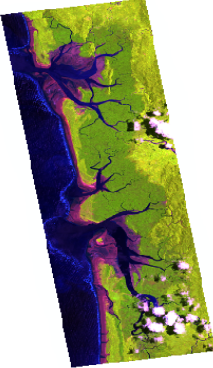

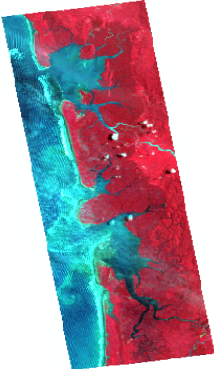
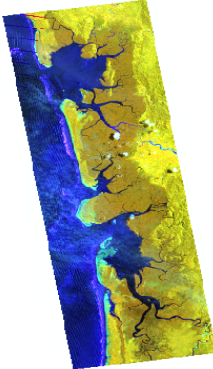
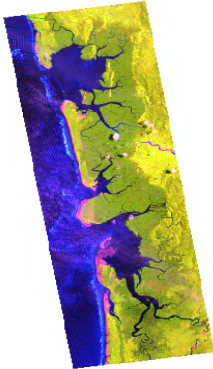
Se obtuvieron 4 combinaciones espectrales para los productos satelitales, y se pudo diferenciar visualmente los BM frente a otras coberturas vegetales (Tabla 6). La combinación verdadero color evidenció que la vegetación de BM presentó tonos verdes oscuros y un brillo bajo para la imagen de 1998 y

2014 y ligeramente un tono verde más claro para la imagen del 2014 que no es influenciada por la marea. Para la combinación infrarrojo color, el BM presentó tonos de rojo oscuro y con bajo brillo, la imagen del 2014 en pleamar presentó un brillo mucho más bajo, resaltando los grandes contenidos de humedad de la vegetación frente a las otras coberturas vegetales que presentaron tonos rojizos a rosados. De igual manera, para la combinación falso

color compuesto 1, el BM presentó un color marrón con un tono oscuro para la imagen de 1998 y 2014, demostrando grandes contenidos de humedad en la vegetación y presentando gran contraste frente a las demás coberturas. La combinación falso color

compuesto 2 reveló una coloración verde moderadamente oscura, permitiendo el fácil reconocimiento de la cobertura; sin embargo, se observaron diferencias en las tonalidades respecto al estado mareal.

Tabla 6. Combinaciones de bandas empleadas en el estudio.

Combinación de bandas			
Verdadero color	Infrarrojo color	Falso color compuesto 1	Falso color compuesto 2
Landsat 5 - 1998			
			
Landsat 8 - 2014			
			
Landsat 7 - 2017			
			

3.4 Firma espectral de bosques de manglar

La firma espectral para la reflectancia ToA se calculó para las tres imágenes (Figura 3). Se encontró

que la reflectancia promedio para la banda NIR de la imagen de 2017 con respecto a la reflectancia NIR de 2014 y 1998 mostró una diferencia de 12,6% y 17,9%, respectivamente.

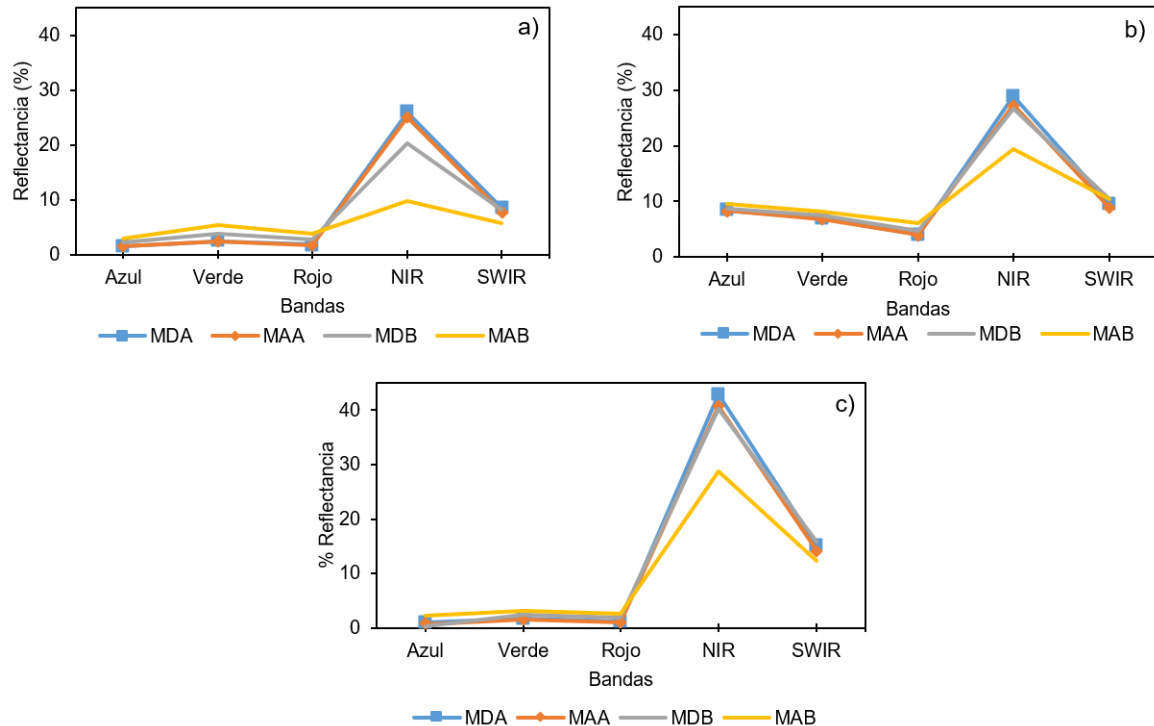


Figura 3. Firma espectral estimada para los BM en los productos Landsat a) 1998, b) 2014 y c) 2017. Dónde: Manglar denso alto (MDA), Manglar abierto alto (MAA), Manglar denso bajo (MDB), Manglar abierto bajo (MAB).

En todos los casos presentados, los BM en sus diferentes densidades (MDA, MAA, MDB y MAB) presentaron valores de reflectancia más elevados en el infrarrojo cercano, siendo coherente con la firma

espectral promedio de la vegetación. En tal sentido, los valores de reflectancia mínimos, máximos y promedios registrados para cada densidad de BM se presentan en la Tabla 7.

3.5 Índices de vegetación

Se observó que los valores para la densidad de MAB en los tres IV en el año de 1998 fueron los más bajos con 0,28, 0,021 y 0,41 para el NDVI, SAVI y CMRI, respectivamente (Figura 4). Se encontró que los valores de IV tienden a disminuir ligeramente según la

densidad y también se percibió que las condiciones de pleamar en la imagen de 2014 tienden a registrar valores más bajos de IV con respecto a la imagen de 2017. En la Tabla 8 se presentan los valores mínimos, máximos y promedios de los IV registrados para cada año en las diferentes densidades de BM presentes en el área de estudio.

Tabla 7. Valores promedio de reflectancia estimados para las densidades de bosques de manglar.

Banda	Landsat 5 - 1998											
	MDA			MAA			MDB			MAB		
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
Azul	0,8	2,8	1,5	0,8	2,5	1,5	1,2	4,3	2,1	1,0	6,7	3,0
Verde	1,0	5,0	2,4	1,0	4,5	2,4	1,9	8,1	3,7	1,4	13,1	5,4
Rojo	0,9	2,9	1,8	0,9	2,6	1,7	0,9	6,3	2,7	1,6	8,3	3,8
NIR	16,5	32,8	26,0	13,3	30,5	25,0	2,1	31,0	20,3	1,6	32,8	9,8
SWIR	5,4	14,5	8,5	5,2	10,0	7,8	1,4	15,0	8,3	1,2	18,0	5,8
	Landsat 8 - 2014											
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
Azul	7,9	14,2	8,3	7,6	10,6	8,2	8,1	11,1	8,6	8,3	11,2	9,5
Verde	6,2	12,8	7,0	5,4	9,1	6,8	6,1	9,6	7,5	6,8	9,8	8,1
Rojo	3,3	10,5	4,0	3,0	6,7	3,9	3,7	9,0	4,7	4,0	8,8	6,0
NIR	20,1	34,7	28,9	12,2	36,5	27,3	14,1	33,8	26,6	9,2	31,1	19,3
SWIR	7,1	15,7	9,6	3,8	11,3	8,9	5,7	13,0	10,4	7,0	16,2	10,4
	Landsat 7 - 2017											
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
Azul	0,3	2,7	1,0	0,0	2,3	0,7	1,2	3,2	0,3	0,5	4,7	2,2
Verde	0,6	3,1	1,8	0,8	3,5	1,6	1,5	3,9	2,5	1,2	4,9	3,1
Rojo	0,5	2,4	1,2	0,5	2,8	1,0	0,9	3,4	1,8	1,1	4,7	2,7
NIR	28,2	51,2	43,0	1,8	48,9	40,8	16,1	48,9	40,2	12,0	47,2	28,7
SWIR	10,0	19,2	15,2	8,9	17,2	14,2	7,2	20,5	15,9	4,7	24,4	12,3

Donde: Mínimo (Min), Máximo (Max) y Promedio (Prom).

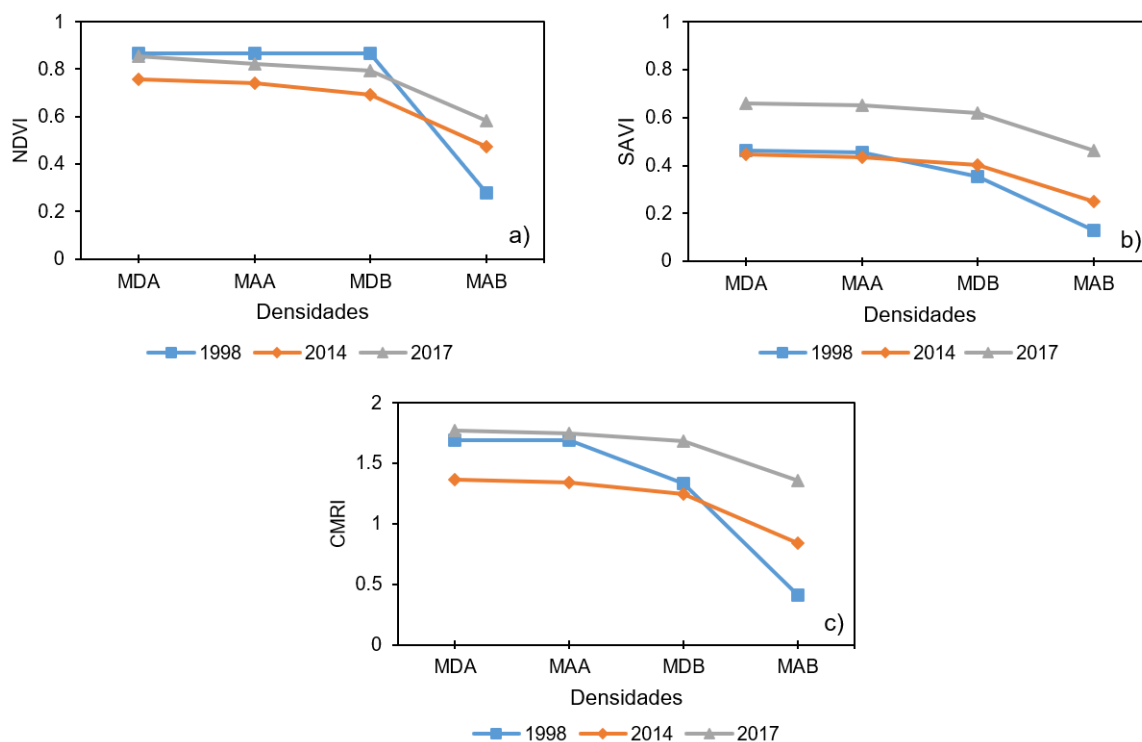


Figura 4. Valores estimados para los índices de vegetación según las densidades de bosque de manglar y temporalidad analizada a) NDVI b) SAVI y c) CMRI. Dónde: Manglar Denso Alto (MDA), Manglar Abierto Alto (MAA), Manglar Denso Bajo (MDB), Manglar Abierto Bajo (MAB).

Tabla 8. Valores de índice de vegetación para cada densidad de bosques manglar.

Índice	Landsat 5 - 1998											
	MDA			MAA			MDB			MAB		
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
NDVI	-0,6	0,96	0,87	-0,2	0,95	0,87	-0,6	0,96	0,87	-0,62	0,92	0,28
SAVI	-0,1	0,62	0,46	-0,03	0,58	0,45	-0,1	0,56	0,36	-0,1	0,62	0,13
CMRI	-1,3	1,93	1,69	-0,5	1,92	1,69	-0,9	1,86	1,34	-1,34	1,8	0,41
Índice	Landsat 8 - 2014											
	MDA			MAA			MDB			MAB		
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
NDVI	-0,1	0,84	0,76	0,07	0,83	0,74	0,18	0,83	0,69	0,18	0,83	0,69
SAVI	0,03	0,63	0,45	0,02	0,58	0,43	0,07	0,62	0,4	0,12	0,57	0,25
CMRI	-0,4	1,56	1,37	-0,1	1,53	1,34	0,3	1,53	1,25	-0,01	1,5	0,84
Índice	Landsat 7 - 2017											
	MDA			MAA			MDB			MAB		
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
NDVI	0,26	1,32	0,86	0,21	1,21	0,82	0,24	1,22	0,79	0,16	1,16	0,58
SAVI	0,29	0,83	0,66	0,15	0,79	0,65	0,26	0,78	0,62	0,15	0,74	0,46
CMRI	1,01	2,26	1,77	0,64	2,13	1,75	0,98	2,1	1,68	0,51	1,98	1,36

Donde: Mínimo (Min) Máximo (Max) y Promedio (Prom).

3.6 Monitoreo de bosques de manglar

Se observó que entre el año 1998-2014 se registró un aumento promedio del valor del NDVI y el CMRI

para los MAB del 0,19 y 0,42, respectivamente (Figura 5), y los aumentos se observaron sobre las zonas costeras que están en constante interacción con la marea.

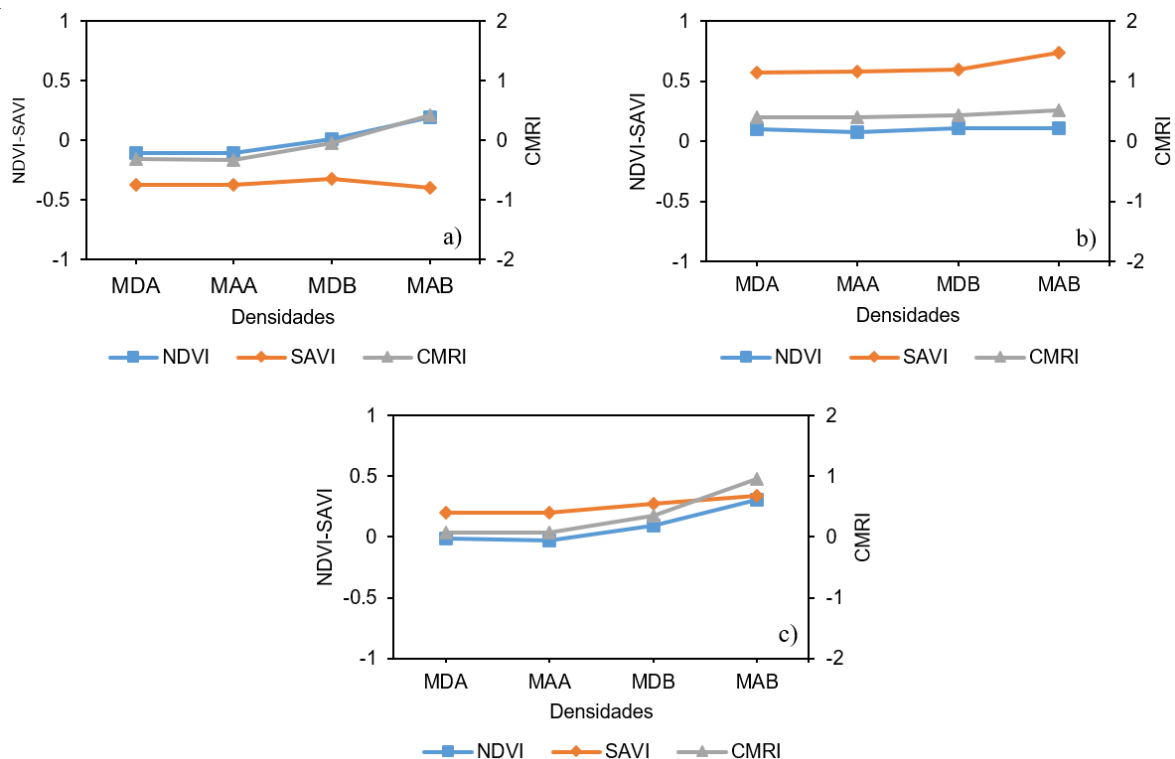


Figura 5. Comportamiento de índices de vegetación para las diferentes densidades de manglar a) 1998-2014, b) 2014-2017 y c) 1998-2017.

Por su parte, el periodo 2014-2017 registró un aumento para los valores del SAVI superiores a 0,5 para todas las densidades. El periodo 1998-2017 registró un aumento promedio en los valores de NDVI y CMRI de 0,09 y 0,35 para los MDB y de 0,31 y 0,95 para los MAB, respectivamente; a su vez, el SAVI presentó aumentos en el valor superiores a 0,2 en todas las densidades (Figura 6).

4 Discusión

La combinación de bandas espectrales es una técnica de análisis visual que permite la identificación de diferentes tipos de cobertura a través de sus características espectrales (Chuvieco, 1995; Pérez y Riva, 1998; Horning, 2014; Mohamed, 2017), y su aplicación en la BM es válida en la medida que se empleen combinaciones que resalten esta cobertura, como el infrarrojo color (NIR, Rojo, Verde) y el falso color compuesto 1 (NIR, SWIR, Rojo) concordando con lo expuesto por Pagkalinawan (2014). Sin embargo, un aspecto importante que se debe considerar al momento de realizar análisis espectrales en BM de la zona es la presencia de nubes y sombras, ya que esta región presenta un gran volumen de precipitaciones (Blanco, Escobar-Sierra y Carvajal-Quintero, 2014), las cuales pueden afectar en gran medida los valores de reflectancia del BM y pueden ser un factor limitante para llevar a cabo análisis multitemporales y de cambios primordiales para el monitoreo, tal como lo expresan Pimple y col. (2018) y (Wang y col., 2019). Si bien en este estudio se encontró una baja cobertura de nubes, el enmascaramiento eliminó una parte del manglar en la zona sur, ocasionando incertidumbre sobre los valores de reflectancia correspondientes al área eliminada.

La reflectancia de la banda infrarroja de 1998 y 2014 varió con respecto a la de 2017 entre el 12,6 y 17,9%, respectivamente; sin embargo, estos valores se encuentran dentro del rango reportado por autores como Mondal, Trzaska y De Sherbinin (2018) y Perea-Ardila, Oviedo-Barrero y Leal-Villamil (2019). Por otra parte, el MAB para 1998 presentó un promedio de reflectancia en la banda infrarroja del 9%, valor que es cercano al reportado por Vaghela y col. (2018) para manglares abiertos de la India. Los bajos valores en la reflectividad infra-

roja pueden ser provocados por el alto contenido de humedad que se presenta en los manglares por efecto del aumento de las mareas (Winarso y Purwanto, 2017; Gupta y col., 2018); por el contrario, la reflectividad en la banda infrarroja reportada para el año 2017 presentó valores altos (superiores al 40%) para tres de las densidades de BM (MDA, MAA y MDB), mientras que el MAB obtuvo valores promedios superiores al 28% en condiciones de bajamar, resultados que coinciden con lo reportado por Zhang y col. (2017) y Xia y col. (2018).

La firma espectral de los BM puede variar debido a los efectos de la marea, por consiguiente, es afectada debido a la cantidad de agua bajo el dosel del BM al momento de la captura de las imágenes. Debido a esta situación, se pueden obtener diferentes respuestas espectrales para los BM en diferentes fechas y densidades, normalmente, se tiende a subestimar la superficie de manglares con imágenes que solo consideran un único estado mareal, siendo este último aspecto es de gran interés para la investigación de la Teledetección en manglares Zhang y Tian (2013). El comportamiento de los valores de IV de los años 2014 y 2017 fue similar al descrito para la reflectancia infrarroja, pero con una disminución sobre el valor de la imagen en pleamar; de igual forma, el valor de los IV disminuyó conforme se redujo la densidad de los BM (el NDVI y el CMRI visualizaron mejor esta situación).

La evaluación espacio-temporal de los IV (1998-2014, 2014-2017 y 1998-2017) se evidenció que los cambios de dichos índices ocurrieron en el periodo 1998-2014 donde se registró aumento en el valor promedio para el MAB del 19% en el NDVI; asimismo, para el periodo 1998-2017 la variación positiva del valor promedio fue del 31% para el NDVI; sin embargo, estas variaciones en el IV se registraron sobre los BM ubicados principalmente en la franja tierra-mar, donde existe una fuerte interacción de la marea y los manglares que pudiesen estar sumergidos periódicamente, lo cual generó una diferencia entre los valores de los IV (Jia y col., 2019; Xia y col., 2020). De igual manera, cuando se realizó la comparación 2014-2017 los valores promedio del NDVI y CMRI se mantuvieron con una tendencia constante positiva cercana al valor cero (0), siendo esta la comparación de imágenes en pleamar y bajamar.

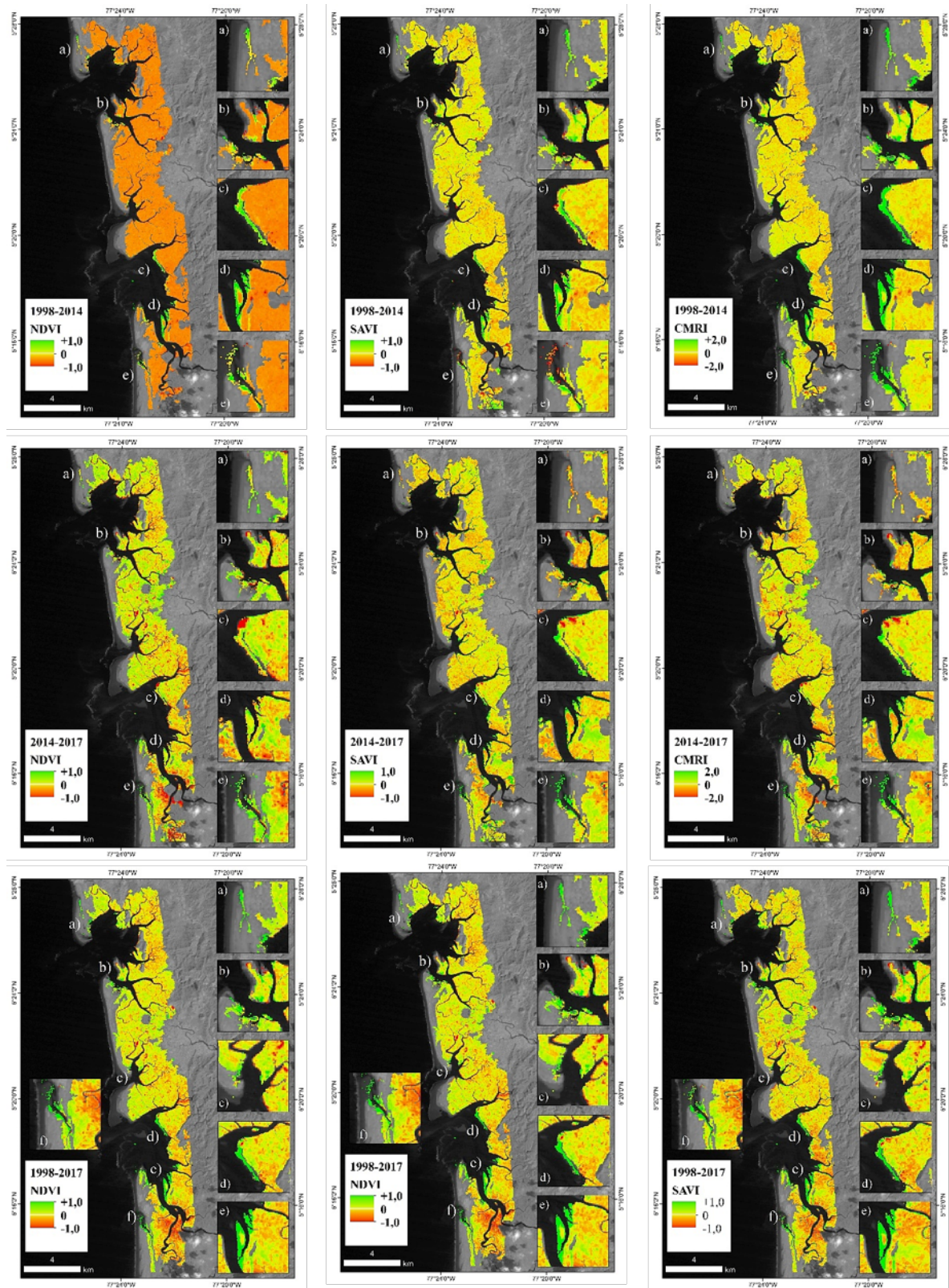


Figura 6. Índices de vegetación para el monitoreo de bosques de manglar. a), b), c), d), e), f).

El valor de SAVI más bajo fue de +0,13 para los MAB de la imagen de 1998, valores que son similares a los reportados por Rhyma et al. (2020) para manglares de Malasia utilizando imágenes SPOT; sin embargo, dentro de la comparación 1998-2014 se observó que los valores promedio tuvieron tendencia hacia los cambios negativos (disminuciones que pueden superar el 30%), mientras que para 2014-2017 los valores promedio de SAVI fueron superiores al 50% para todas las densidades. Esta variación puede estar relacionada con los hallazgos de Rhyma y col. (2020) quienes señalaron que se deben probar diferentes valores para el factor de ajuste L del índice SAVI en las diferentes densidades de manglar, ya que su valor debe ajustarse conforme a las condiciones de humedad del suelo por la marea en cada sitio. De igual manera, Xia y col. (2020) indicaron que el NDVI y el SAVI obtienen mejores rendimientos en manglares cuando los análisis se realizan con imágenes capturadas en marea baja, ya que el IV no pueden detectar eficientemente los manglares sumergidos, dificultando la caracterización y monitoreo.

La propuesta del CMRI es reciente, pero ha sido aplicado en diferentes estudios de monitoreo de manglares a nivel mundial (Ahmad y col., 2019; Chen, 2020; Diniz y col., 2019; Ghosh y col., 2020). Este estudio reflejó una primera aplicación del CMRI para el monitoreo de manglares en Colombia; los resultados aquí plasmados indicaron que los BM estuvieron en constante producción fotosintética a lo largo de 19 años y que el valor de los índices reflejó que los BM de ese sitio en particular se encontraban en muy buenas condiciones fisiológicas. Este IV pudiese traer mejores resultados para imágenes con diferentes condiciones de marea al eliminar el efecto de los contenidos de humedad en el suelo mediante el uso del NDWI, (Baloloy y col., 2020).

5 Conclusiones

Las imágenes Landsat son un recurso importante para el monitoreo de manglares, ya que permiten su identificación a través de la respuesta espectral de los BM y la posibilidad de realizar análisis espacio-temporales abarcando un largo periodo de tiempo. La identificación visual de los BM en productos Landsat debe realizarse empleando combinaciones de bandas con uso de NIR como son el infrarrojo

color (NIR, Rojo, Verde) y el falso color compuesto 1 (NIR, SWIR, Rojo); en tal sentido, la respuesta espectral de los BM se ve afectada por las condiciones de humedad bajo el dosel que son ocasionadas por la fluctuación de las condiciones mareales. El uso de los IV permitió reconocer que la zona costera del área de estudio presentó constantes cambios en sus valores, principalmente influenciadas por el estado mareal. Es necesario tomar en cuenta este aspecto al momento de analizar los IV en BM, ya que es primordial para la implementación de otros procesos de análisis y clasificación más detallados, para procurar obtener la menor incertidumbre posible. Este estudio incorporó el uso del CMRI, que es un IV desarrollado específicamente para el estudio de BM y en este caso tuvo buenos rendimientos frente a los objetivos planteados. Este estudio es un referente para futuras investigaciones en la caracterización espectral y monitoreo de BM con imágenes Landsat en el litoral norte del Pacífico colombiano.

Agradecimientos

Este estudio se desarrolló bajo el contexto del proyecto denominado: "Planificación y Ordenamiento de los Litorales y Áreas Marinas Colombianas" de la Dirección General Marítima-DIMAR en Colombia, el autor principal agradece al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico-CCCP y al laboratorio de SIG y Sensores Remotos en Tumaco por la colaboración prestada.

Referencias

- Ahmad, Z. y col. (2019). «Impact of coastal development on mangrove distribution in C6YTherating Estuary, Pahang, Malaysia». En: *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences* 15.3, 456-461. Online: <https://bit.ly/36OYYje>.
- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) Versión 1.0*. Inf. téc. Bogotá: Centro de Investigación y Desarrollo – CIAF, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Asner, G. (1998). «Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance». En: *Remote sensing of Environment* 64.3, 234-253. Online: <https://bit.ly/3hVvgzg>.

- Ávila, D. y col. (2020). «Variación espacio-temporal de la respuesta espectral en manglares de La Habana, Cuba, evaluada con sensores remotos». En: *Revista de Biología Tropical* 68.1, 321-335. Online: <https://bit.ly/3kF9SQM>.
- Baloloy, A. y col. (2020). «Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping». En: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 166, 95-117. Online: <https://bit.ly/2Tw2dcq>.
- Bannari, A y col. (1995). «A review of vegetation indices». En: *Remote sensing reviews* 13.1-2, 95-120. Online: <https://bit.ly/3Bw8ENw>.
- Blanco, J. F., C. Escobar-Sierra y J. D. Carvajal-Quintero (2014). «Gorgona, Baudó y Darién (Chocó Biogeográfico, Colombia): ecorregiones modelo para los estudios ecológicos de comunidades de quebradas costeras». En: *Revista de Biología Tropical* 62.1, 43-64. Online: <https://bit.ly/2UQYl6z>.
- Chander, G. y B. Markham (2003). «Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges». En: *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 41.11, 2674-2677. Online: <https://n9.cl/wygm>.
- Chen, N. (2020). «Mapping mangrove in Dongzhaigang, China using Sentinel-2 imagery». En: *Journal of Applied Remote Sensing* 14.1, 1-11. Online: <https://bit.ly/3hY0I06>.
- Chow, J. (2017). «Mangrove management for climate change adaptation and sustainable development in coastal zones». En: *Journal of Sustainable Forestry* 37.2, 139-156. Online: <https://bit.ly/36UshrBI>.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. 2nd ed. Madrid: Ediciones RIALP S.A.
- (2010). *Teledetección Ambiental*. 3rd ed. Barcelona: Ariel Editorial.
- Congalton, R. (1991). «A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data». En: *Remote Sensing of Environment* 37.1, 35-46. Online: <https://bit.ly/3kUfMgX>.
- Conti, L., C. Sampaio y M. Cunha (2016). «Spatial database modeling for mangrove forests mapping; example of two estuarine systems in Brazil». En: *Modeling Earth Systems and Environment* 2.73, 1-12. Online: <https://bit.ly/3kPkInf>.
- DIMAR-CCCP (2013). *Zonificación fisiográfica del litoral Pacífico colombiano. Fase I*. Inf. téc. Dirección General Marítima: San Andrés de Tumaco: Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico.
- Diniz, C. y col. (2019). «Brazilian mangrove status: Three decades of satellite data analysis». En: *Remote Sensing* 11.7, 1-19. Online: <https://bit.ly/3y78oCI>.
- Dirección General Marítima., ed. (2020). *Red de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (REDMPOMM). Infraestructura de Datos Espaciales Marítima, Fluvial y Costera de Colombia*.
- ESRI (2014). Redlands, USA.
- FAO (2007). *The world's mangroves 1980-2005*. Food y Agriculture Organization of the United Nations.
- Franco, R. (2017). *Composiciones Landsat en ARCGIS. Guía Básica*. MIXDYR. Online: <https://bit.ly/3iXYcWX>.
- Galeano, A. y col. (2017). «Mangrove resilience to climate extreme events in a Colombian Caribbean Island». En: *Wetlands ecology and management* 25.6, 743-760. Online: <https://bit.ly/36UD5PJ>.
- Gao, B. (1996). «NDWI A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space». En: *Remote Sensing of Environment* 358, 257-266. Online: <https://bit.ly/3x1kps2>.
- Ghosh, S. y col. (2020). «A preliminary study on upstream migration of mangroves in response to changing environment along River Hooghly, India». En: *Marine pollution bulletin* 151, 1-14. Online: <https://bit.ly/3iFWKYT>.
- Giri, C. (2016). «Observation and Monitoring of Mangrove Forests Using Remote Sensing: Opportunities and Challenges». En: *Marine pollution bulletin* 8.9, 1-8. Online: <https://bit.ly/3iCgAV0>.
- Gupta, K. y col. (2018). «An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery». En: *MethodsX* 5, 1129-1139. Online: <https://bit.ly/2UzJIEz>.
- Holdridge, L. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*. Centro Interamericano de Documentación e Información Agrícola-IICA.
- Horning, N. (2014). *Selecting the appropriate band combination for an RGB image using Landsat imagery Version 1.0*. American Museum of Natural History, Center for Biodiversity y Conservation.

- Huete, A. (1988). «A soil-adjusted vegetation index (SAVI)». En: *Remote sensing of environment* 25.3, 295-309. Online: <https://bit.ly/3zuX8jY>.
- Jia, M. y col. (2019). «New Vegetation Index to Detect Periodically Submerged Mangrove Forest Using Single-Tide Sentinel-2 Imagery». En: *Remote Sensing* 11, 1-17. Online: <https://bit.ly/3iToERo>.
- Kuenzer, C. y col. (2011). «Remote sensing of mangrove ecosystems: A review». En: *Remote Sensing* 3.5, 878-928. Online: <https://bit.ly/2UHovII>.
- Mohamed, E. (2017). «Consideration of landsat-8 Spectral band combination in typical mediterranean forest classification in Halkidiki, Greece». En: *Open Geosciences* 9.1, 468-479. Online: <https://bit.ly/36Zo7Yt>.
- Mondal, P., S. Trzaska y A. De Sherbinin (2018). «Landsat-derived estimates of mangrove extents in the Sierra Leone coastal landscape complex during 1990–2016». En: *Sensors* 18.12, 1-15. Online: <https://bit.ly/3BxOpiF>.
- Monirul, I., B. Helena y K. Lalit (2018). «Monitoring mangrove forest land cover changes in the coastline of Bangladesh from 1976 to 2015». En: *Geocarto International* 31.13, 1458-1476. Online: <https://bit.ly/2VbEc1l>.
- Muhsoni, F. y col. (2018). «Comparison of different vegetation indices for assessing mangrove density using sentinel-2 imagery». En: *Int. J. Geomate* 14, 42-51. Online: <https://bit.ly/3eMwOcT>.
- Omar, H., M. Misman y V. Linggok (2018). «Characterizing and monitoring of mangroves in Malaysia using Landsat-based spatial-spectral variability». En: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 169, 24-25. Online: <https://bit.ly/3hWSAwK>.
- Pagkalinawan, E. (2014). «Mangrove forest mapping using Landsat 8 images». En: *State of the mangrove summit: Northwestern Luzon Proceedings*, 60-64. Online: <https://bit.ly/2TxBoLj>.
- Perea-Ardila, M., F. Oviedo-Barrero y J. Leal-Villamil (2019). «Cartografía de bosques de manglar mediante imágenes de sensores remotos: estudio de caso: Buenaventura, Colombia.» En: *Revista de Teledetección* 53.1, 73-86. Online: <https://bit.ly/3ygOWU8>.
- Pérez, F. y J. De la Riva (1998). «El empleo de imágenes Landsat TM para la detección y cartografía de áreas incendiadas en el Prepirineo occidental oscense». En: *Geographica* 36, 131-145. Online: <https://bit.ly/36XtEij>.
- Pham, T. y col. (2019). «Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: Opportunities and challenges». En: *Remote Sensing* 11.3, 1-24. Online: <https://bit.ly/3rFIMf2>.
- Pimple, U. y col. (2018). «Google earth engine based three decadal landsat imagery analysis for mapping of mangrove forests and its surroundings in the trat province of Thailand». En: *Journal of Computer and Communications* 6, 246-264. Online: <https://bit.ly/3BBa7SU>.
- Purwanto, A. y W. Asriningrum (2019). «Identification of mangrove forests using multispectral satellite imageries». En: *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)* 16.1, 63-86. Online: <https://bit.ly/36YbtJn>.
- Rebello-Mochel, F. y F.J. Ponzoni (2007). «Spectral characterization of mangrove leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiaçu Bay, Maranhão State». En: *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 79.4, 683-692. Online: <https://bit.ly/3rEKZGj>.
- Rhyma, P. y col. (2020). «Integration of normalised different vegetation index and Soil-Adjusted Vegetation Index for mangrove vegetation delineation». En: *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 17, 1-70. Online: <https://bit.ly/3y2s4ru>.
- Rodríguez-Rodríguez, J.A. y col. (2016). «The Wetland Book». En: Dordrecht: Springer Netherlands. Cap. Mangroves of Colombia.
- Rouse, J., J. Haas R. Shell y D. Deering (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Goddard Space Flight Center.
- USGS (1998). «USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) Level-1 Data Products». En: *Landsat 4-5 TM Collection 1*. Landsat Scene ID LT50100561998003CPE00. U.S Geological Survey. Online: <https://bit.ly/3b7KDjI>.
- (2014). «USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 8 OLI Level-1 Data Products». En: *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) Collection 1*. Landsat Scene ID LC80100562014239LGN01. U.S Geological Survey. Online: <https://bit.ly/3b7KDjI>.
- (2017). «USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 7 ETM+ Level-1 Data Products». En: *Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Collection 1*. Landsat Scene ID LE70100562017111EDC00. U.S Geological Survey. Online: <https://bit.ly/3b7KDjI>.

- (2018a). *Landsat 7 Data Users Handbook. Version 2.0*. Inf. téc. U.S Geological Survey.
- (2018b). *Landsat 8 Data Users Handbook - Versión 3.0*. Inf. téc. U.S Geological Survey.
- (2020). *EarthExplorer*. Prog. U.S Geological Survey.
- Umroh, A. y S. Sari (2016). «Detection of mangrove distribution in Pongok Island». En: *Procedia Environmental Sciences* 33, 253-257. Online:https://n9.cl/w48d.
- Vaghela, B. y col. (2018). «Multi criteria decision making (MCDM) approach for mangrove health assessment using geo-informatics technology». En: *International Journal of Environment and Geoinformatics* 5.2, 114-131. Online:https://bit.ly/3rx4Zuo.
- Wang, L. y col. (2019). «A review of remote sensing for mangrove forests: 1956-2018». En: *Remote Sensing of Environment* 231, 1-150. Online:https://bit.ly/2WcAxd.
- Wilkie, M. y S. Fortuna (2003). *Status and trends in mangrove area extent worldwide*. Food y Agriculture Organization of the United Nations.
- Winarso, G. y A. Purwanto (2017). «Evaluation of mangrove damage level based on Landsat 8 image». En: *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences* 11.2, 105-116. Online:https://bit.ly/3rutwjS.
- Xia, Q. y col. (2018). «Mapping mangrove forests based on multi-tidal high-resolution satellite imagery». En: *Remote Sensing* 10.1343, 2-20. Online:https://bit.ly/3l6iPD5.
- Xia, Q. y col. (2020). «Evaluation of submerged mangrove recognition index using multi-tidal remote sensing data». En: *Ecological Indicators* 113, 1-140. Online:https://bit.ly/3kRKpDH.
- Zhang, X. y Q. Tian (2013). «A mangrove recognition index for remote sensing of mangrove forest from space». En: *Current Science* 105.8, 1149-1155. Online:https://bit.ly/3i0V11a.
- Zhang, X. y col. (2017). «Mapping mangrove forests using multi-tidal remotely-sensed data and a decision-tree-based procedure». En: *International journal of applied earth observation and geoinformation* 62, 201-214. Online:https://bit.ly/3i0jVOr.
- Zhu, Z. y C. Woodcock (2014). «Automated cloud, cloud shadow, and snow detection in multitemporal Landsat data: An algorithm designed specifically for monitoring land cover change». En: *Remote Sensing of Environment* 152, 217-234. Online:https://bit.ly/3ByuHDD.



EVALUACIÓN DE INFORMACIÓN RELACIONADA CON COMBUSTIBLES EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO PARA EL MODELADO Y SIMULACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES, CASO DE ESTUDIO: INCENDIO DEL CERRO ATACAZO

ASSESSMENT OF FUEL RELATED DATA IN THE METROPOLITAN DISTRICT OF QUITO FOR MODELING AND SIMULATION OF WILDFIRES, CASE STUDY: ATACAZO HILL WILDFIRE

Juan Gabriel Mollocana Lara*, César Iván Álvarez Mendoza y Luis
Jonathan Jaramillo Coronel

Grupo de Investigación Ambiental en el Desarrollo Sustentable GIADES, Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica Salesiana, Quito 170702, Ecuador

*Autor para correspondencia: jmollocana@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 04 de abril de 2021. Aceptado, tras revisión, el 29 de junio de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) no cuenta con toda la información necesaria para diseñar estrategias de gestión de incendios forestales basadas en modelos y simulaciones. Este trabajo evaluó el uso de información relacionada con incendios forestales del DMQ obtenida de fuentes gubernamentales y libres, tomando como caso de estudio el incendio del cerro Atacazo (29/09/2018). Se procesó información topográfica, meteorológica y de combustibles; las hojas topográficas se obtuvieron del portal del Instituto Geográfico Militar, la información meteorológica de la estación Guamaní de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, y la información de combustibles y cobertura vegetal se estimó en base a las categorías de vegetación y nivel de alteración del mapa de cobertura y uso de la tierra del proyecto Cartografía Temática a Escala 1:25000 del Ecuador ejecutado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Se realizaron simulaciones en FlamMap de los trayectos principales y tiempos de arribo del incendio para dos casos: el Caso 1 contempla barreras de fuego construidas con los datos de OpenStreetMap; y el Caso 2 complementa esta información con observaciones en campo. Se utilizó imágenes satelitales para comparar la extensión del incendio real con las simulaciones, usando los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen; obteniendo 0.81 y 0.85 (Caso 1), y 0.78 y 0.81 (Caso 2), respectivamente. Estos resultados mostraron una gran similitud entre el comportamiento del modelo y el incendio real. Una vez validado el modelo, se aplicó para estimar el comportamiento del incendio en varios escenarios de interés; se comprobó que el diseño de barreras de fuego en base a simulaciones tiene gran potencial para disminuir el área de afectación de un incendio.

Palabras clave: FlamMap, simulación incendios forestales, modelado incendios forestales, sensores remotos.

Abstract

The Metropolitan District of Quito (DMQ) does not have all the information needed to design wildfire management strategies based on models and simulations. This work evaluated the use of information related to wildfires in the DMQ obtained from governmental and free sources, using the case study of the Atacazo Hill wildfire (09/29/2018). Topographic, meteorological and fuel data from different sources were processed. The topographic information was obtained from the topographic sheets of the Military Geographical Institute; the meteorological information was obtained from Guamaní station of the Metropolitan Network of Atmospheric Monitoring of Quito, and the fuel and vegetation cover information was estimated based on vegetation and alteration level categories of the coverage and land use map of the Thematic Cartography at Scale 1:25000 of Ecuador Project, executed by the Ministry of Agriculture, Livestock, Aquaculture, and Fisheries. The major paths and the fire arrival times were simulated on FlamMap for two different cases. In Case 1, the simulation included fire barriers based on OpenStreetMap data. Additional information gathered during field visits was included in Case 2. Satellite imagery was used to compare the real wildfire extent with the simulated extent using Sorensen and Cohen's kappa coefficients, obtaining 0.81 and 0.85 for Case 1, and 0.78 and 0.81 for Case 2, respectively. These results showed great similarity between the behavior of the model and the real wildfire. After the model was validated, it was applied to estimate the wildfire behavior in various scenarios of interest; it was found that the design of fire barriers based on simulations has great potential to reduce the affected area of a wildfire

Keywords: FlamMap, wildfires simulation, wildfires modeling, remote sensing.

Forma sugerida de citar: Mollocana, J.G., Álvarez, C.I. y Jaramillo, L.J. (2021). Evaluación de información relacionada con combustibles en el Distrito Metropolitano de Quito para el modelado y simulación de incendios forestales, caso de estudio: Incendio del cerro Atacazo. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 34(2):45-62. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.03>.

IDs Orcid:

Juan Gabriel Mollocana Lara: <http://orcid.org/0000-0002-2430-8400>

César Iván Álvarez Mendoza: <http://orcid.org/0000-0001-5629-0893>

Luis Jonathan Jaramillo Coronel: <http://orcid.org/0000-0002-3127-9855>

1 Introducción

En los últimos años, grandes incendios forestales han sido noticia en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ); en el periodo julio 2019 – septiembre 2019 se registraron 285 incendios forestales que consumieron casi 2500 ha de cobertura vegetal. Los incendios forestales son una de las amenazas naturales y antrópicas más recurrentes en el territorio del DMQ, y son considerados eventos catastróficos debido a su gran impacto ambiental (Secretaría de Seguridad DMQ, 2015). Los impactos de un incendio forestal que pueden afectar a corto o largo plazo a ecosistemas y comunidades cercanas incluyen: pérdida de servicios ecosistémicos, amenaza a especies en peligro de extinción, simplificación de la estructura y composición biológica de bosques, entrada de especies invasoras, y generación de condiciones climáticas secas por la emisión de gases de efecto invernadero (Moore y col., 2003; Barkhordarian y col., 2019).

La aplicación de modelos y simulaciones para la gestión, prevención y respuesta a incendios forestales abarca diversos enfoques (DeMagalhães y col., 2017; Srivastava y col., 2018; Botequim y col., 2019; Jahdi y col., 2019; Palaiologou y col., 2020; Xofis y col., 2020). Por ejemplo, el Servicio Forestal Canadiense (CFS; Canadian Forest Service) desarrolla diversos modelos y aplicaciones de software para realizar predicciones en la propagación de un incendio. Entre estas herramientas están el Modelo Canadiense de Efectos de Incendios (CanFIRE; Canadian Fire Effects Model), usado para predecir el comportamiento de un incendio a corto plazo, y el Sistema de Análisis Probabilístico de Incendios (PFAS; Probabilistic Fire Analysis System), usado para predecir efectos a largo plazo. Con estas herramientas se evalúa la necesidad de intervención para suprimir un incendio cuando es muy probable que no se extinga naturalmente, ahorrando cientos de millones de dólares anuales en costos por supresión de incendios (Fitch y col., 2018; Government of Canada, 2020).

Tradicionalmente, el modelado de incendios forestales incluye la predicción de la propagación del incendio, la intensidad y la longitud de la llama. Parte de variables fáciles de medir relacionadas con el tipo de combustible, topografía del terreno y condiciones climáticas superficiales. Los tipos de com-

bustibles suelen clasificarse en distintas categorías que dependen de su cantidad, densidad aparente, contenido calórico y humedad de extinción. Las características de estas categorías de combustibles sirven como entradas para los modelos semiempíricos de comportamiento de fuego implementados en software como FlamMap y FIRESITE (Bakhshaii y Johnson, 2019; Zigner y col., 2020).

FlamMap es un software para modelado y simulación de incendios desarrollado por el Programa de Ciencias de Fuego, Combustible y Humo de Estados Unidos (FFS; Fire, Fuel, and Smoke Science Program) y ampliamente aplicado en la actualidad (Hernández y col., 2007; Jahdi y col., 2016; Botequim y col., 2017; Conner y col., 2018; Rios y col., 2019). Este programa implementa varios modelos semiempíricos para estimar el comportamiento, crecimiento y propagación de un incendio. Para realizar simulaciones en una zona determinada usando este software hace falta información meteorológica, topográfica y de combustibles. Este programa puede generar distintas salidas en base a los resultados de simulaciones de comportamiento de incendios, Tiempo de Viaje Mínimo (MTT; Minimum Travel Time) y Modelado de Optimización de Tratamientos (TOM; Treatment Optimization Model) (Finney, 2006; Stratton, 2009).

Los modelos de incendios forestales semiempíricos son los más usados en la actualidad, sin embargo, tienen varias limitaciones; entre ellas está su enfoque en la representación del comportamiento de un incendio, mas no en los mecanismos de combustión y transferencia de calor. Además, realizan varias simplificaciones con el fin de proveer métodos de fácil ejecución a través asunciones estadísticas y aproximaciones geométricas en dos dimensiones de procesos tridimensionales. Por otro lado, la nueva generación de modelos atmosféricos de incendios forestales incluye la aplicación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD; Computational Fluid Dynamics) para resolver numéricamente modelos físicos tridimensionales de combustión, transferencia de calor, aerodinámica y turbulencia. Además, estos modelos incluyen métodos de Predicción Numérica de Clima (NWP; Numerical Weather Prediction) que permiten simular la interacción del incendio con la atmósfera cercana. De esta forma, se puede representar la dinámica de procesos tridimensionales complejos que pueden

ocurrir durante un incendio, como penachos de humo, remolinos de fuego, vórtices horizontales, combinación de fuego y vientos de montaña, fuego de chimenea, y tormentas de fuego. La principal desventaja de estos modelos es la gran cantidad de recursos computacionales que requieren, por lo que su aplicabilidad está enfocada a la investigación (e.g. FIRETEC) (Bakhshaii y Johnson, 2019).

El principal inconveniente para la simulación de incendios forestales con FlamMap en el DMQ es que no existe ninguna base de datos con características de combustibles y porcentajes de vegetación destinada a la gestión de incendios forestales en el DMQ. Sin embargo, existen mapas de tipo de vegetación y uso de suelo generados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) y el Ministerio de Ambiente y Agua del Ecuador (MAAE) con información que puede ser relacionada al tipo de combustible de una zona. Estos datos, en combinación con mapas de OpenStreetMap e imágenes satelitales, pueden ser potenciales fuentes de información de combustibles destinadas a la simulación de un incendio (MAAE, 2020; MAGAP, 2015). Además, para poder identificar incendios que sirvan como casos de estudio en el DMQ se pueden usar herramientas de teledetección de incendios forestales como el sistema FIRMS de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA; National Aeronautics and Space Administration) (NASA, 2021) o, en su defecto, implementar algoritmos basados en redes neuronales e imágenes satelitales multispectrales (Govil y col., 2020; Mujtaba y Wani, 2018; Govil y col., 2020).

El objetivo del presente trabajo es evaluar el uso de la información disponible en el DMQ para modelar y simular incendios forestales utilizando el software FlamMap y estimando las propiedades de los combustibles con información de libre acceso y de entes gubernamentales, tomando como caso de estudio el incendio del cerro Atacazo, ocurrido en septiembre del 2018 (Cuerpo de Bomberos DMQ, 2018). Para validar los resultados de las simulaciones se comparará la extensión real y simulada de incendio usando los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen (Banko, 1998). Por último, se evaluará la aplicación del modelo para la simulación de escenarios de interés, estos son: comportamiento del incendio en condiciones climáticas extremas, comportamiento del incendio ante barreras de fuego es-

tratégicamente diseñadas y comportamiento del incendio ante la falla de una barrera de fuego.

2 Materiales y Métodos

El caso de estudio de esta investigación es el incendio del cerro Atacazo ocurrido el 29 de septiembre del 2018; para modelar y validar este incendio se contemplaron cuatro fases: recopilación de datos, procesamiento de datos, simulación y validación (Figura 1). En la primera fase, se recopiló información meteorológica de la estación meteorológica Guamaní de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ.), información topográfica de la carta topográfica de la parroquia Amagüña del DMQ levantada por el Instituto Geográfico Militar (IGM), y se realizó una estimación de la cobertura vegetal y del tipo de combustible partiendo del mapa de cobertura y uso de la tierra del Proyecto Cartografía Temática a Escala 1:25000 del MAGAP. Este mapa posee categorías que clasifican el terreno según el tipo de vegetación (herbácea, arbustiva y bosques) y nivel de alteración (bajo, medio y alto). Además, se utilizaron los datos de caminos y coberturas naturales de OpenStreetMap para complementar la información de combustibles. Esto se debe a que los senderos, caminos secundarios, cuerpos de agua y zonas rocosas pueden comportarse como barreras contra incendios naturales o no intencionadas (Rigolot y col., 2004). En la segunda fase, se creó un archivo LCP que contiene los datos de pendiente, elevación, orientación, modelos de combustibles y cobertura vegetal, un archivo WXS con los datos meteorológicos, y dos mapas con las barreras de fuego para el Caso 1 y el Caso 2. La extensión del incendio del cerro Atacazo se estimó en base a imágenes satelitales Sentinel-2. En la fase tres, la simulación de la extensión del incendio se realizó a través del cálculo del MTT en FlamMap. Por último, la precisión de la simulación se calculó con el coeficiente de Sorensen y el coeficiente kappa de Cohen.

2.1 Caso de estudio

El cerro Atacazo se encuentra en Ecuador, provincia de Pichincha, en el límite sur del DMQ con el cantón Mejía (Figura 2). Su cima se ubica en el punto 0°21'15.8"S 78°37'14.3"W a una altura de 4463 metros sobre el nivel del mar. El cerro Atacazo es un

estratovolcán que forma parte de la Cordillera Occidental, su temperatura media es de 11,9 °C, posee un clima tropical húmedo y su vegetación es principalmente páramo con vegetación herbácea. El incendio del cerro Atacazo inició el 29 de septiembre del 2018, tuvo una duración de cuatro días y consumió más de 1200 ha del DMQ y el Cantón Mejía (Figura 3). Según los reportes del Cuerpo de Bomberos del DMQ, el incendio se reportó a las 14h50 horas del 29 de septiembre del 2018, logró ser controlado a las 7h06 del 2 de octubre del 2018 y fue monitoreado durante dos días más. La duración del incendio, desde su reporte hasta su hora de control,

fue de 2 días, 16 horas y 16 minutos (3856 minutos en total). Resulta de interés mencionar que en la cima del cerro Atacazo existen instalaciones de antenas de telecomunicación. Por esta razón, existen vías de segundo orden que pueden recorrerse en vehículos con doble transmisión que llegan muy cerca de la cobertura de rocas de la cima. Esta información tiene gran importancia debido a que un camino, lo suficientemente ancho para ser recorrido por un automóvil, puede comportarse como barrera de fuego en un incendio, así mismo, las rocas y arenales cercanos a la cima de un volcán son superficies donde el fuego no se propaga.

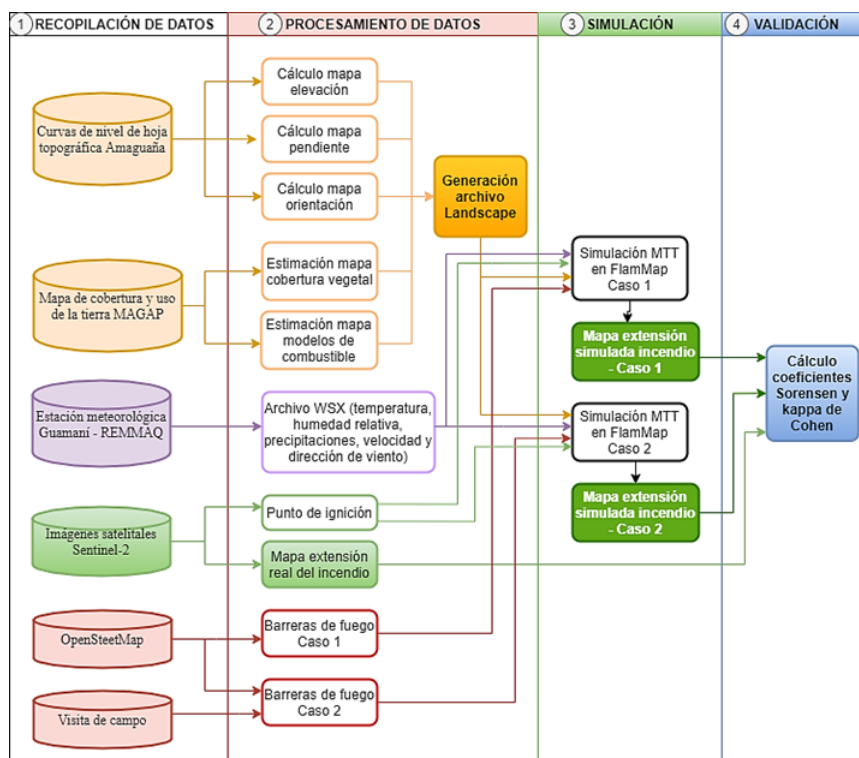


Figura 1. Diagrama metodología (elaboración propia).

2.2 Modelado de incendios forestales

El modelo semiempírico de propagación de fuego superficial de Rothermel es uno de los más usados para describir el comportamiento de un incendio forestal. Por lo general, este modelo se aplica en conjunto con otros modelos de intensidad de llama, longitud de llama, fuego de corona, conatos de incendio, velocidad de propagación de fuego, creci-

miento del frente de un incendio, entre otros, para el manejo de incendios y combustibles. La ecuación final del modelo de propagación de fuego superficial de Rothermel se detalla a continuación (Andrews, 2018):

Ecuación 1

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_B \epsilon Q_{ig}} \quad (1)$$

Donde:

R es la velocidad de propagación medida en $\frac{m}{min}$.

I_R es la intensidad de reacción medida en $\frac{J}{m^2 \cdot min}$.

ξ es la razón de propagación de flujo.

ϕ_W es un factor relacionado con el efecto del viento en la propagación del fuego.

ϕ_5 es un factor relacionado con el efecto de la pendiente del terreno en la propagación del fuego.

ρ_B es la densidad aparente del combustible medida en $\frac{kg}{m^3}$.

ε es el número de calentamiento efectivo.

Q_{ig} es la cantidad de calor necesaria para encender una libra de combustible medida en $\frac{J}{kg}$.

A pesar de que este modelo existe desde 1972, sigue siendo implementado como parte de modelos más complejos y de simuladores ampliamente usados en la actualidad como FlamMap y FIRESTE. FlamMap es un simulador de incendios forestales que implementa distintos modelos de comportamiento de incendios, estos son:

- Modelo de Rothermel (1972) para propaga-

ción de incendios superficiales.

- Modelo de Van Wagner (1977) para iniciación de fuego de corona.
- Modelo de Rothermel (1991) para propagación de incendio de corona.
- Modelo de Albini (1979) para conatos de incendio.
- Método de cálculo de fuego de corona de Finney (1998) o Scott and Reinhardt (2001).
- Modelo de humedad de combustible muerto de Nelson (2000).

La información geoespacial de entrada para Flam-Map se describe mediante varios *rasters* combinados en un archivo *Landscape* con extensión LCP; la información meteorológica puede ser procesada por la herramienta *WindNinja* e ingresada en formato WSX. Además, otros datos como barreras de fuego y puntos de ignición pueden definirse mediante mapas con información de tipo vector.

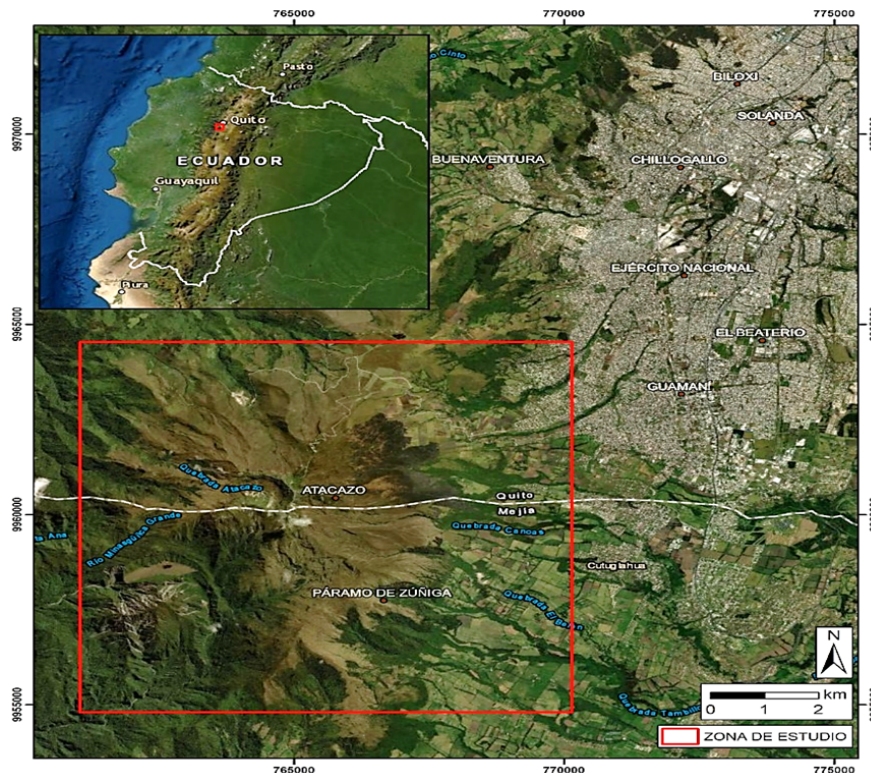


Figura 2. Ubicación del cerro Atacazo (elaboración propia).

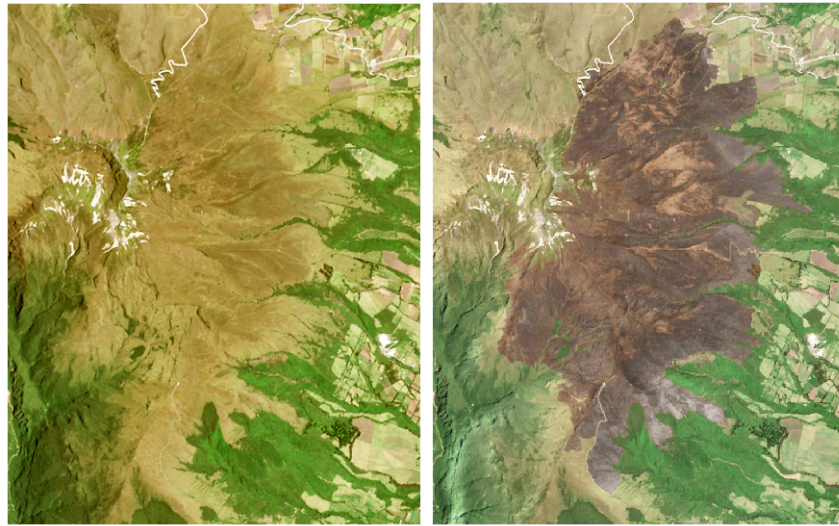


Figura 3. Imágenes Sentinel-2 cerro Atacazo. Antes del incendio – 29/09/2018 (izquierda) y después del incendio – 24/10/2018 (derecha).

2.3 Procesamiento de datos

2.3.1 Archivo *Landscape*

Para generar el archivo *Landscape* para FlamMap es necesario crear cinco *rasters*: elevación o altura, pendiente, orientación, cobertura vegetal y modelos de combustible. Para esto, es importante que todos los *rasters* tengan el mismo tamaño de celda o píxel (en este caso 20×20 m), que sus píxeles coincidan exactamente, y cubran la misma zona de estudio. Además, se necesita indicar a través de un archivo

con extensión PRJ la proyección usada, en este caso, WGS84 zona 17S.

2.3.2 Creación de *rasters* de altura, pendiente y orientación

Los *rasters* de altura, pendiente y orientación se obtienen partiendo de las curvas de nivel de la hoja topográfica de Amaguaña. Para esto se usó el software ArcGis y el procedimiento descrito en la Figura 4. El resultado de este proceso se muestra en la Figura 5.

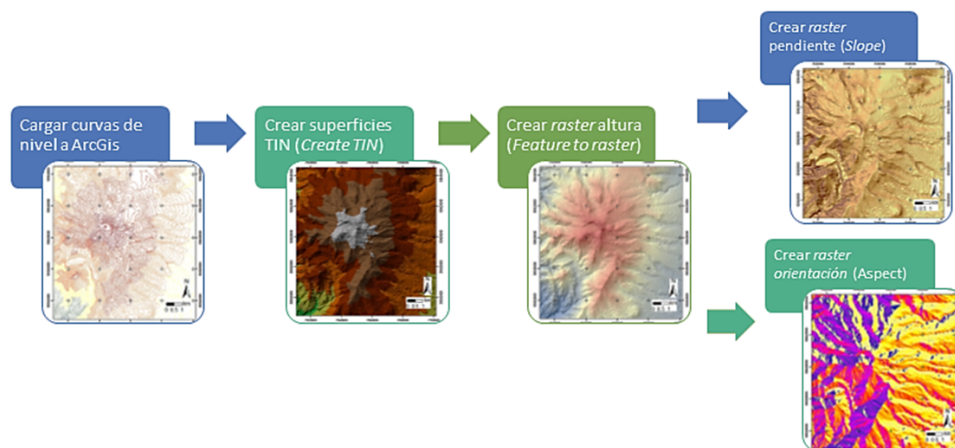


Figura 4. Procedimiento para crear los *rasters* de altura, pendiente y orientación (elaboración propia).

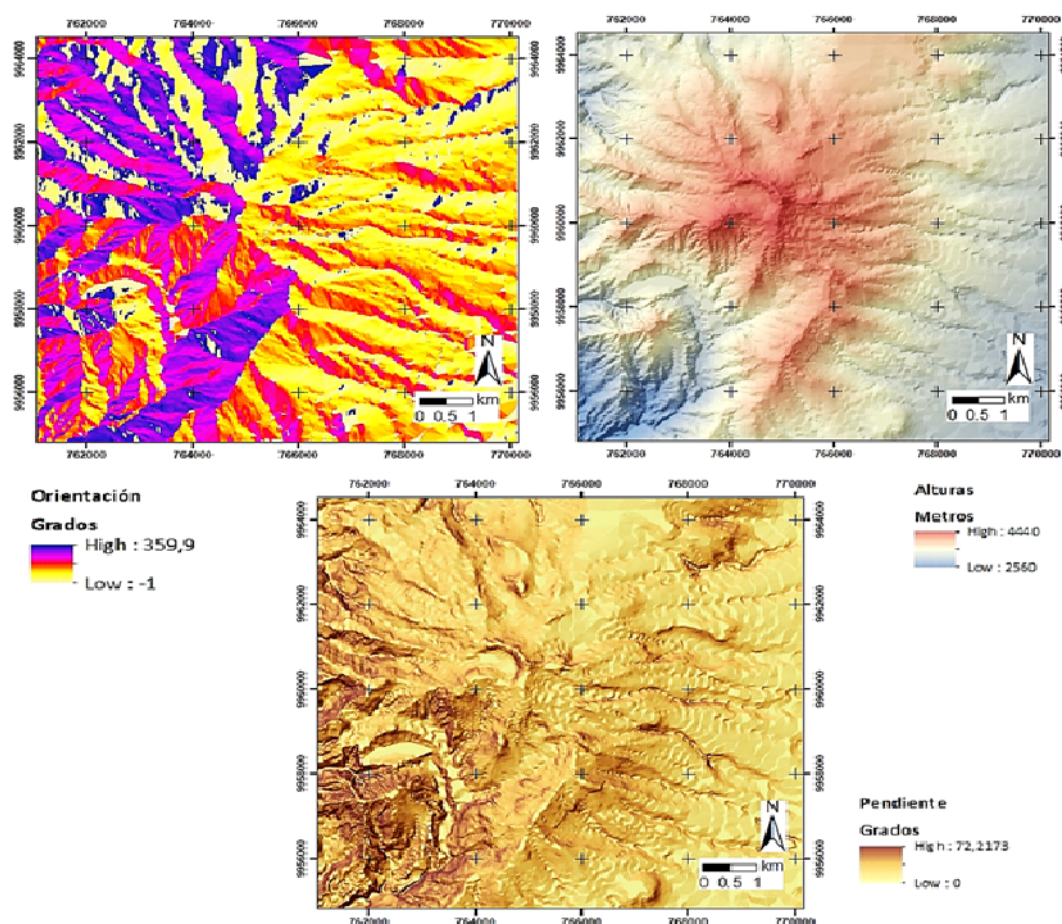


Figura 5. *Rasters* de altura, pendiente y orientación de la zona de estudio (elaboración propia).

2.3.3 Creación de *rasters* de modelos de combustible y cobertura vegetal

Para generar los *rasters* de cobertura vegetal y modelos de combustible se partió del mapa de cobertura y uso de la tierra del Proyecto Cartografía Temática a escala 1:25000 del MAGAP. Este mapa está en formato vectorial y cuenta con el atributo "cobertura" que contiene 25 categorías de tipo de cobertura y uso de la tierra de la zona del cerro Atacazo. Los tipos de vegetación indicados en estas categorías son relacionados con los modelos de combustibles de Scott-Burgan para generar el *raster* de combustibles para FlamMap (Scott y Burgan, 2005). Por otro lado, los niveles de alteración del terreno se relacionan con rangos de porcentajes de cobertura vegetal para generar el *raster* de cobertura. Además, se consideraron las indicaciones de la guía de selección

de combustibles del Grupo Coordinador Nacional de Incendios Forestales de Estados Unidos (NWCG; *National Wildfire Coordinating Group*). Con esta información se creó la base de datos de la Tabla 1, donde los atributos "fuel_value" y "cc_class" se usaron para crear los *rasters* de modelos de combustibles y cobertura vegetal, respectivamente (Figura 6). En esta tabla se asigna a cada categoría del atributo "cobertura" un modelo de combustible ("fuel_type") con su respectivo código numérico ("fuel_value") y una clase de cobertura vegetal ("cc_class"). En la clase de cobertura vegetal, el valor 0 corresponde con 0% de cobertura, 1 con de 1 a 25% de cobertura, 2 con de 26 a 50% de cobertura, 3 con de 51 a 75% de cobertura y 4 con de 76 a 99% de cobertura. Cabe mencionar que la información levantada corresponde al año 2015, es la más actual y con la mejor resolución encontrada.

Tabla 1. Base de datos de cobertura, modelos de combustible, código numérico de modelos de combustible, y cobertura vegetal (elaboración propia).

cobertura	fuel_type	fuel_value	cc_class
AREA EN PROCESO DE URBANIZACION	NB1	91	0
CENTRO POBLADO URBANO	NB1	91	0
MISCELANEO DE CICLO CORTO	NB3	93	0
MISCELANEO FORESTAL	NB3	93	0
PAPA	NB3	93	0
PASTO CULTIVADO	NB3	93	0
LAGO/LAGUNA	NB8	98	0
AREA EN PROCESO DE EROSION	NB9	99	0
CANTERA	NB9	99	0
MINA	NB9	99	0
VEGETACION HERBACEA HUMEDA MUY ALTERADA	GR1	101	4
VEGETACION HERBACEA HUMEDA POCO ALTERADA	GR5	105	4
PARAMO HERBACEO MEDIANAMENTE ALTERADO	GR3	103	3
PARAMO ARBUSTIVO MEDIANAMENTE ALTERADO	GS4	124	2
PARAMO HERBACEO POCO ALTERADO	GR5	105	4
MATORRAL HUMEDO MUY ALTERADO	TU1	161	1
PARAMO HERBACEO MUY ALTERADO	GR1	101	2
MATORRAL HUMEDO POCO ALTERADO	GH4	144	3
PARAMO ARBUSTIVO MUY ALTERADO	GS3	123	1
MATORRAL HUMEDO MEDIANAMENTE ALTERADO	SH4	144	2
BOSQUE HUMEDO MEDIANAMENTE ALTERADO	TU2	162	2
PINO	TU2	162	2
BOSQUE HUMEDO POCO ALTERADO	TU3	163	3
EUCALIPTO	TU4	164	2

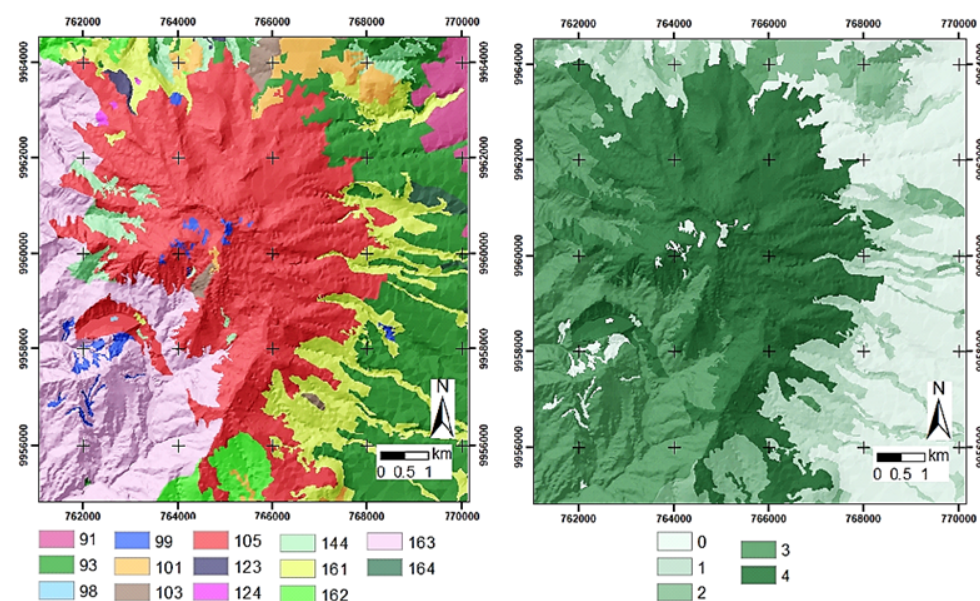


Figura 6. Raster de modelos de combustible y cobertura vegetal de la zona de estudio (elaboración propia).

2.3.4 Creación de archivo wxs con condiciones meteorológicas

Las variables meteorológicas de interés son temperatura, humedad relativa, nubosidad, precipitaciones, velocidad de viento y dirección de viento. Todas estas variables, a excepción de la nubosidad, están disponibles en la estación Guamaní de la REMAQ entre el 29 de septiembre y el 5 de octubre del 2018. Con estos datos se generará un archivo con extensión WXS que contiene la información meteorológica de entrada para los cálculos de la humedad de combustible muerto que realiza FlamMap.

Tabla 2. Variables meteorológicas de archivo WXS y su valor medio (elaboración propia).

Variable	Unidades	Valor medio
Temperatura	Grados centígrados	14
Humedad relativa	Porcentaje	59
Precipitaciones	Centésimas de milímetros	0
Velocidad de viento	Kilómetros por hora	6
Dirección de viento	Grados	181
Nubosidad	Porcentaje	0

2.3.5 Punto de ignición

Una de las ventajas del caso de estudio del incendio del cerro Atacazo es que se dispone de una imagen satelital Sentinel-2 con poca nubosidad poco tiempo después de su primer reporte. El incendio fue visualizado desarrollándose en el lado sur del cerro Atacazo y reportado a las 14h50 del 29 de septiembre de 2018. Además, una de las teorías de su inicio es que se produjo por una quema agrícola fuera de control. Por estas razones, se tomó como punto de ignición el área negra cercana a sembríos, visualizada en la Figura 7. Se creó un *shapefile* interpretado sobre la imagen satelital con la forma de esta área que será usado para las simulaciones MTT en FlamMap.

2.3.6 Barreras de fuego según mapa de *OpenStreet-Map*

Se pudo identificar, mediante un reconocimiento de la zona, los caminos transitables por vehículos. El ancho de estos caminos y la poca altura de la vegetación herbácea de su alrededor hacen posible que se comporten como barreras de fuego. Por otro lado, los cuerpos de agua y zonas rocosas de la cima son superficies donde el fuego no se propaga. Con estas observaciones y la información de la plataforma

OpenStreetMap se generaron dos conjuntos de barreras de fuego. El Caso 1 contempla barreras de fuego construidas únicamente con los datos de *OpenS-*

treetMap, mientras que, el Caso 2 complementa esta información con observaciones en campo (Figura 8).

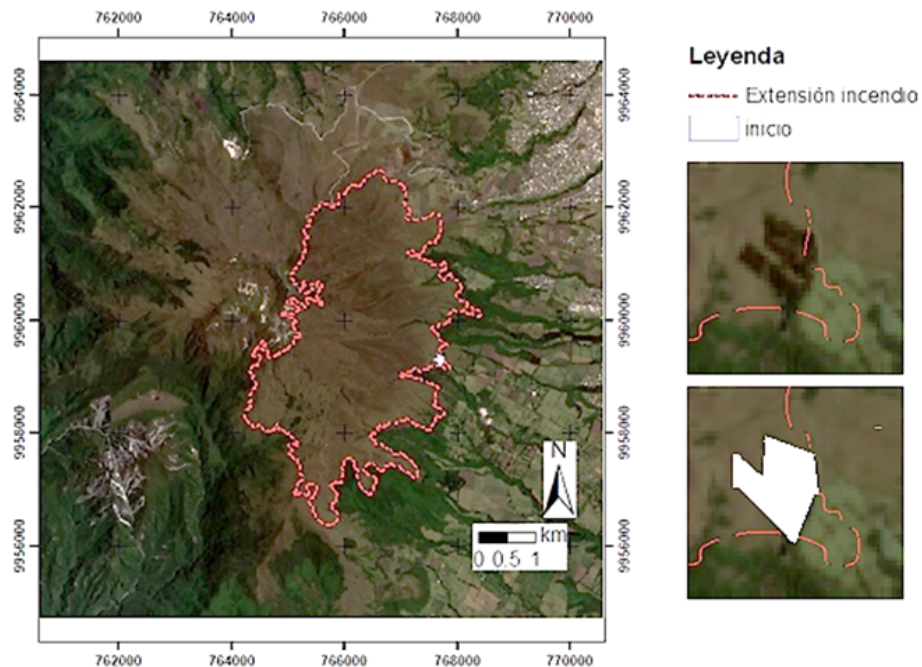


Figura 7. Punto probable de ignición del incendio del cerro Atacazo (elaboración propia).

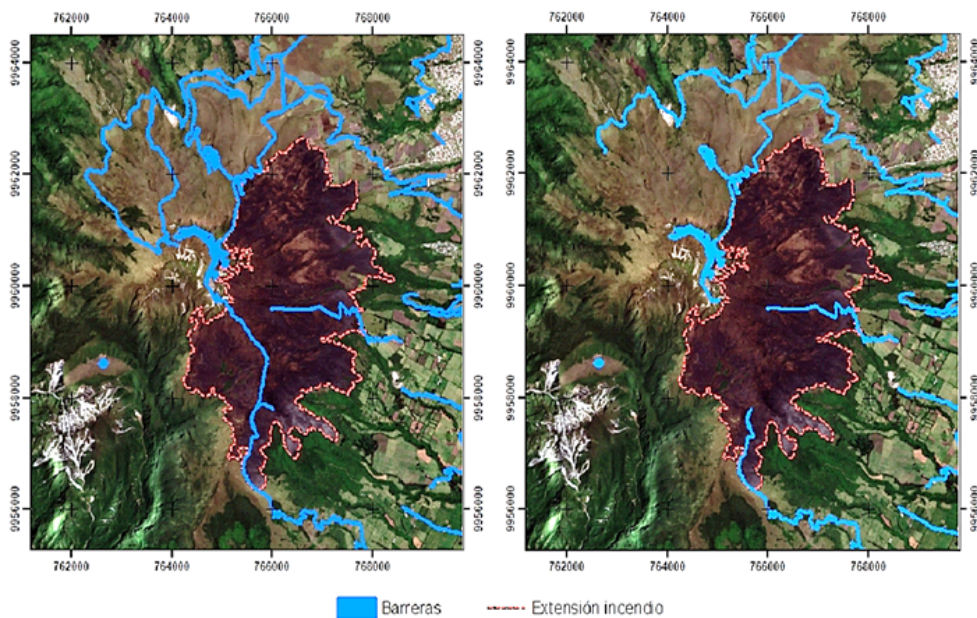


Figura 8. Barreras de fuego: Caso 1 (izquierda), Caso2 (derecha) (elaboración propia).

2.4 Medidas de error

2.4.1 Coeficiente de Sorensen

Este coeficiente tiene como objetivo comparar la similitud de dos muestras con información de la existencia o no existencia de una característica determinada. En el contexto de la simulación de incendios forestales se puede comparar las zonas quemadas o no quemadas del incendio real con las simulaciones. La fórmula para el cálculo de este coeficiente es la siguiente:

Ecuación 2

$$SC = \frac{2a}{2a + b + c} \quad (2)$$

Donde:

SC es el coeficiente de Sorensen.

a es el número de celdas quemadas en la simulación e incendio real.

b es el número de celdas quemadas en la simulación y no quemadas en el incendio real.

c es el número de celdas no quemadas en la simulación y quemadas en el incendio real.

2.4.2 Coeficiente kappa de Cohen

El coeficiente kappa de Cohen es una medida de error que puede derivarse de una matriz de error o matriz de confusión. Este coeficiente evalúa el ajuste general de la matriz de error tomando en cuenta los elementos fuera de su diagonal. El contexto de un incendio forestal se puede calcular con la siguiente fórmula:

Ecuación 3

$$KC = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})} \quad (3)$$

Donde:

KC es el coeficiente kappa de Cohen.

r es el número filas de la matriz de error.

N es el número total de observaciones.

x_{ii} es el número de observaciones en la fila i y columna i de la matriz de error.

x_{i+} es el total marginal de la fila i.

x_{+i} es el total marginal de la columna i.

3 Resultados

3.1 Simulación de trayectos principales y tiempo de llegada

En ambos casos, se ejecutaron simulaciones basadas en el MTT para obtener los trayectos principales y el mapa de tiempo de llegada (Figura 9). Los trayectos principales facilitan la identificación de zonas de tratamiento de combustible, mientras que, el mapa de tiempo de llegada permite visualizar la extensión del incendio. En el Caso 1 se puede apreciar que la extensión del incendio es limitada al norte, sur y oeste por las barreras de fuego consideradas, mientras que el cambio de tipo de vegetación es la limitante por el este.

Este tipo de vegetación se clasifica como matorral húmedo muy alterado y corresponde al modelo de combustible TU1 (mezcla de bosque y sotobosque de pasto y arbustos) con porcentaje de cobertura vegetal entre 1 y 25%. En el Caso 2, se puede apreciar que la extensión del incendio es limitada al norte y noroeste por las barreras de fuego consideradas, mientras que el cambio de tipo de vegetación es la limitante por el suroeste, este y sur. La vegetación al este se clasifica como matorral húmedo muy alterado y corresponde al modelo de combustible TU1 (bosque con carga baja de pasto y arbustos) con porcentaje de cobertura vegetal entre 1 y 25%; la vegetación al sur se clasifica como bosque húmedo medianamente alterado y corresponde al modelo de combustible TU2 (bosque con carga moderada de pasto y arbustos) con porcentaje de cobertura vegetal entre 25 y 50%; la vegetación al suroeste se clasifica como bosque húmedo poco alterado y corresponde al modelo de combustible TU3 (bosque con carga moderada de pasto y arbustos) con porcentaje de cobertura vegetal entre 51 y 75%. Cabe mencionar que el fuego comienza a propagarse a través de este último tipo de vegetación al finalizar la simulación.

3.2 Validación del modelo

Para comparar la extensión simulada y real del incendio se calculan los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen. Para esto, es necesario crear *rasters* que clasifiquen cada píxel en celdas "quemadas" y "no quemadas" para calcular los parámetros a, b, y c de la Ecuación 2 (Figura 10) y generar las matrices

de error de la Ecuación 3 (Tabla 3 y Tabla 4). Los valores del coeficiente de Sorensen obtenidos son 0,81 y 0,85 para el Caso 1 y el Caso 2, respectivamente. Los valores del coeficiente kappa de Cohen son 0,78

y 0,81 para el Caso 1 y el Caso 2, respectivamente. Es decir, la simulación donde se complementó la información de *OpenStreetMap* con observaciones en campo presenta mejores resultados.

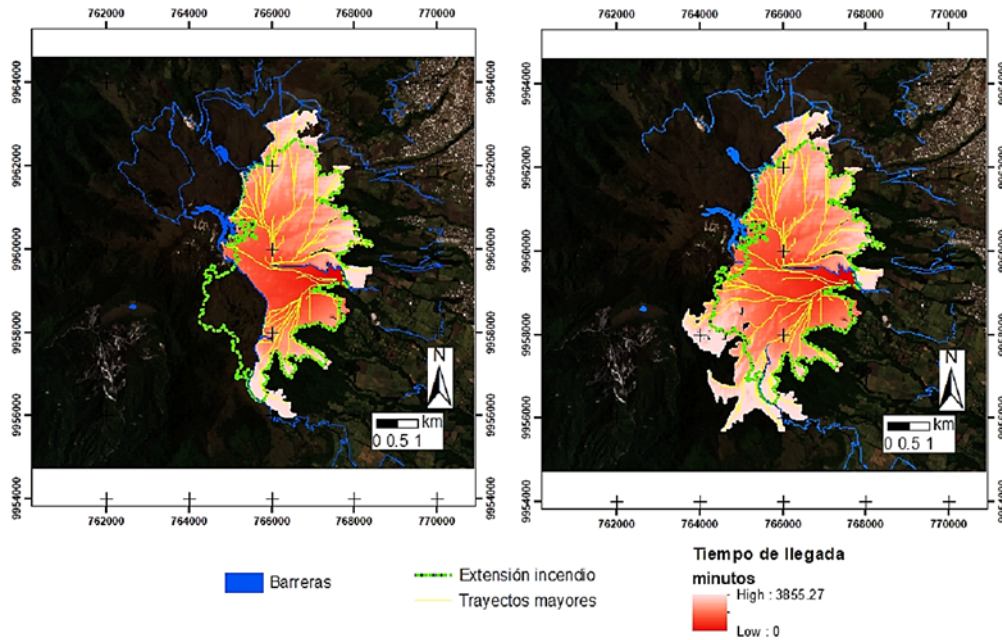


Figura 9. Simulación de trayectos principales y tiempo de llegada para Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha) (elaboración propia).

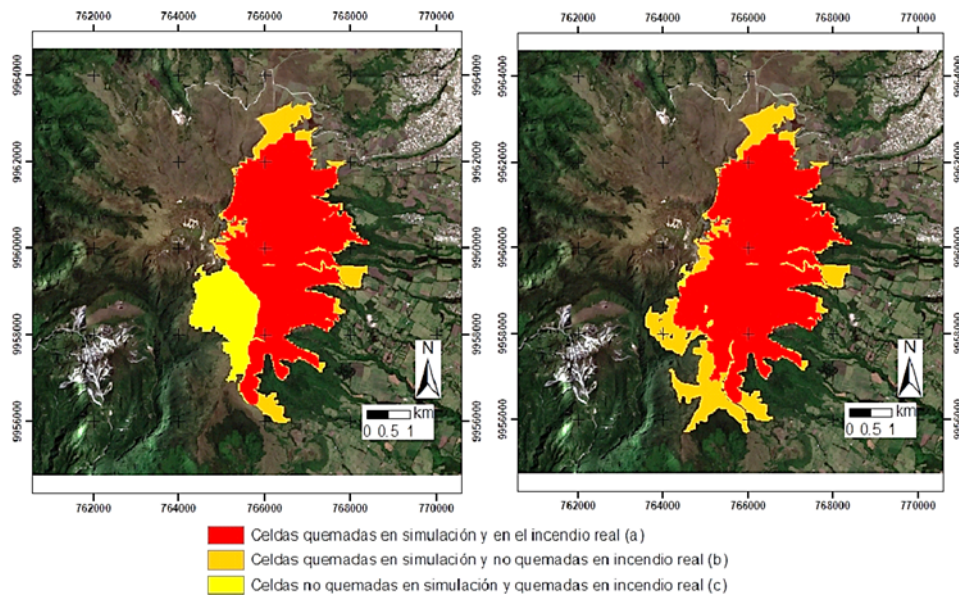


Figura 10. Parámetros para cálculo de coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen para Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha) (elaboración propia).

Tabla 3. Matriz de error simulación Caso 1 (elaboración propia).

	Celda quemada (Simulación)	Celda no quemada (Simulación)	Total
Celda quemada (Real)	25920	6732	32652
Celda no quemada (Real)	5190	183743	188933
Total	31110	190475	221585

Tabla 4. Matriz de error simulación Caso 2 (elaboración propia).

	Celda quemada (Simulación)	Celda no quemada (Simulación)	Total
Celda quemada (Real)	31771	881	32652
Celda no quemada (Real)	10772	178161	188933
Total	42543	179042	221585

3.3 Simulación de escenarios de interés

Con el modelo validado se puede generar distintas simulaciones; en esta investigación se simulan tres escenarios de interés. El primer escenario considera condiciones climáticas extremas con precipitaciones nulas. Se puede observar que el fuego se propaga al suroeste a través de vegetación categorizada como bosque húmedo poco alterado y llega a una zona de altas pendientes (Figura 11), lo que provoca que el incendio se extienda en una gran área que sobrepasa la zona de estudio. En el segundo escenario se simula el comportamiento del incendio ante la falla de una barrera de fuego ubicada al norte de la cima. Se puede observar como el fuego se propaga a una gran área al oeste del cerro Atacazo (Figura 11). El tercer escenario considera dos tratamientos de combustibles; el primer tratamiento consiste en colocar una barrera de fuego que corte los trayectos principales que llevan el incendio hacia el suroeste en el primer escenario; el segundo tratamiento extiende un camino cercano a la cima creando una barrera

que inicia en la frontera agraria, en la parte inferior del cerro, y termina en su cima (Figura 12).

4 Discusión

A pesar de que los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen muestran gran similitud entre las simulaciones y el incendio real, y sus valores concuerdan con estudios similares (Jahdi y col., 2016), se debe mencionar que, entre otras razones, esto se debe a la homogeneidad de la vegetación en la zona. La confiabilidad de la metodología propuesta puede aumentar calibrando el modelo con varios incendios antes de aplicarlo para la simulación de escenarios de interés, por lo que se recomienda hacerlo con al menos tres incendios (Stratton, 2009). En especial, se recomienda calibrar las humedades de los modelos de combustible y las barreras de fuego; para esto se puede combinar simulaciones con observaciones en campo, medidas experimentales o imágenes satelitales.

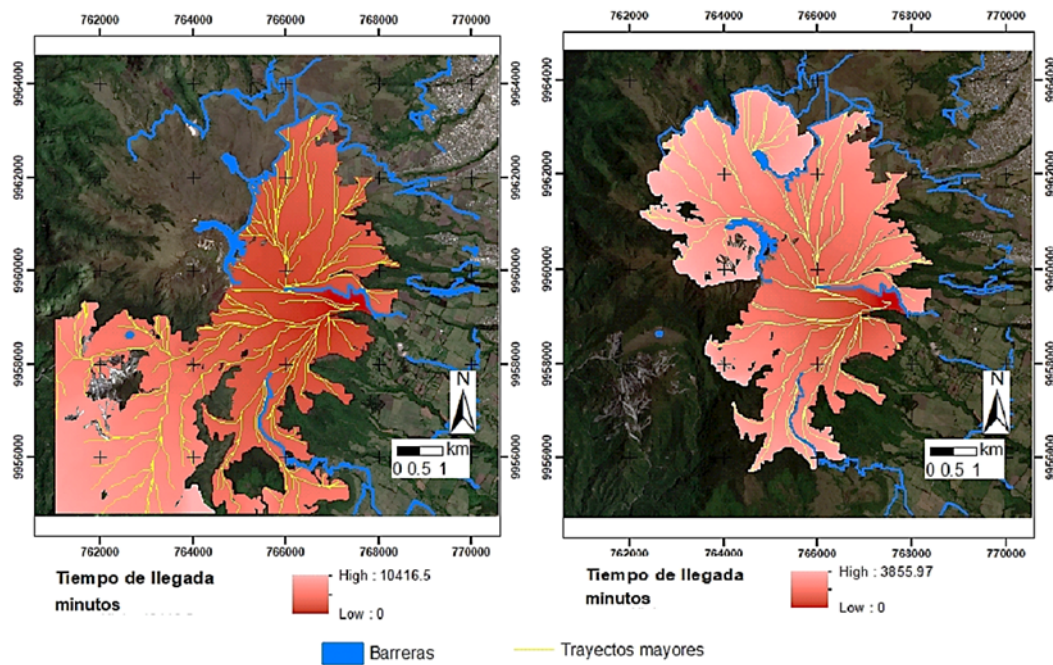


Figura 11. Simulación de trayectos principales y tiempo de llegada para el primer (izquierda) y segundo (derecha) escenario (elaboración propia).

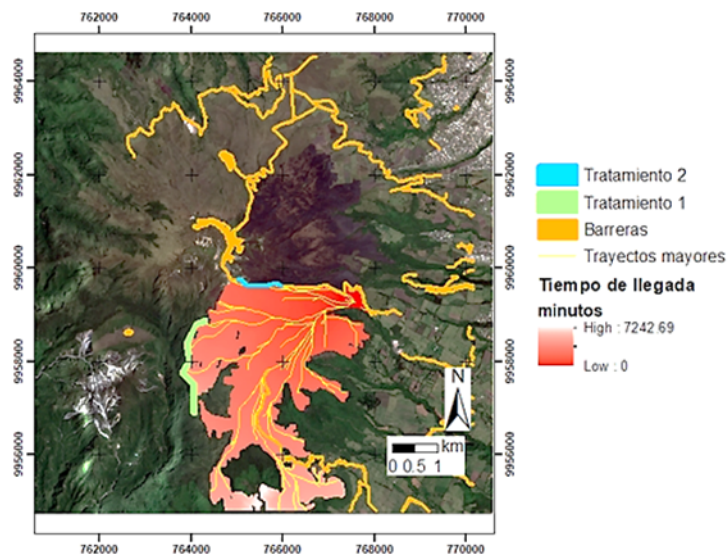


Figura 12. Simulación de trayectos principales y tiempo de llegada para el tercer escenario (elaboración propia).

Por otro lado, existen varias fuentes de error que no se consideraron por la dificultad en su estimación o falta de información, por ejemplo el efecto de las acciones de los bomberos para combatir el fuego

(tampoco se cuenta con información al respecto); los modelos de combustibles usados corresponden a vegetación de ecosistemas presentes en Estados Unidos, lo que excluye ecosistemas típicos de la

cordillera de los Andes, por lo que resulta de interés desarrollar modelos de combustibles propios de la zona de estudio (Elia y col., 2015); mucha información usada no fue levantada con el propósito de simular incendios, para esto se puede levantar desde cero los datos de combustibles y vegetación usando técnicas de Detección y Medición de Objetos por Láser (LIDAR; *Laser Imaging Detection and Ranging*) (Jakubowski y col., 2013; Stefanidou y col., 2020), muestreo aleatorio estratificado, imágenes satelitales multiespectrales, clasificación supervisada, o alguna combinación de estas técnicas. Por otro lado, las condiciones meteorológicas se tomaron de una estación ubicada a más de un kilómetro del cerro Atacazo y el cálculo de los coeficientes de Sorense y kappa de Cohen se realizó con la extensión final del incendio, por lo que no se tiene información de la exactitud del modelo para representar su evolución temporal (Stratton, 2009).

Se puede apreciar, tanto en las simulaciones como en el incendio real, que las zonas clasificadas como páramo herbáceo poco alterado poseen alta propagación de fuego, siendo las barreras de fuego y el cambio de vegetación las limitantes en la extensión final del incendio. El identificar estas limitantes es de gran importancia debido a que el cerro Atacazo posee, al oeste de su cima, una gran cantidad de vegetación de este tipo por donde puede propagarse un incendio si las barreras de fuego no lograsen contenerlo.

Por otro lado, la simulación con el cálculo de las humedades de combustibles en base a las condiciones meteorológicas cambiantes del archivo WSX permite que los resultados se acerquen mucho más al comportamiento real del incendio (Finney, 2006). Una simulación con condiciones meteorológicas fijas implicaría omitir el aumento de la humedad y la disminución de la temperatura en las noches y madrugadas, pudiendo provocar que el fuego se propague por zonas con vegetación de tipo bosque húmedo poco alterado o matorral húmedo muy alterado. En un escenario real, esto correspondería a un incendio que tiene lugar en un verano inusualmente seco y condiciones meteorológicas extremadamente desfavorables (pocas lluvias y vientos fuertes).

Es importante mencionar la efectividad en el control de un incendio que muestra la implementación de barreras de fuego estratégicamente ubica-

das (Figura 12), llegando a ser elementos decisivos en la expansión de un incendio en grandes áreas. Además, su implementación es común en otros países (Rigolot y col., 2004) y resulta bastante conveniente por la existencia de varios senderos y caminos comúnmente usados por turistas y trabajadores, sin embargo, el impacto ecológico de su implementación aún está en discusión (Shinneman y col., 2019). Cabe mencionar que una barrera de fuego correctamente diseñada puede cumplir un doble propósito, primero impedirá la propagación del fuego, y luego facilitará el acceso de personal del cuerpo de bomberos al lugar.

5 Conclusiones

Este trabajo tomó el caso de estudio del incendio del cerro Atacazo que inició el 29 de septiembre del 2018, para evaluar el uso de la información disponible en el DMQ en el modelado y simulación de incendios forestales, usando el software FlamMap. En el DMQ, no existe información levantada dirigida específicamente al modelado y simulación de estas emergencias. En especial, hacen falta datos del tipo de combustible y porcentaje de cobertura vegetal del territorio. Como se mencionó en varias ocasiones, los datos utilizados para estimar los modelos de combustible y los porcentajes de cobertura vegetal no fueron levantados con el propósito de ser usados en el modelado y simulación de incendios forestales. Por esta razón, existen muchas formas de mejorar la confiabilidad de los resultados de la simulación en base a una mejora en la generación de los *rasters* de modelos de combustible y porcentajes de vegetación. Algunas opciones son:

- Generar modelos de combustible propios del DMQ: Los modelos de Scott-Burgan están desarrollados para los tipos de vegetación presentes en Estados Unidos, por lo que usarlos en el DMQ implica una aproximación que puede mejorarse, generando modelos propios para los ecosistemas de alta montaña de la cordillera de los Andes del DMQ (Elia y col., 2015).
- Generar mapas de combustibles y cobertura vegetal desde cero. Las aproximaciones realizadas al levantar los datos de los mapas de cobertura vegetal y uso de las tierras utilizadas en este trabajo pueden implicar grandes cambios en la simulación de un incendio.

Por ejemplo, una pequeña zona mal clasificada puede provocar que el fuego se expanda en áreas muy grandes en una simulación. Además, una zona con un determinado tipo de combustible puede contener áreas con distinto porcentaje de cobertura, lo que implica que el fuego se propague de distinta forma

Referencias

- Andrews, P. (2018). «The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation». En: *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR 371*, 1-121. Online: <https://bit.ly/3fUaBdJ>.
- Bakhshaii, A. y E. Johnson (2019). «A review of a new generation of wildfire-atmosphere modeling». En: *Canadian Journal of Forest Research* 49.6, 565-574. Online: <https://bit.ly/3CEYH1b>.
- Banko, G. (1998). *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data and of Methods Including Remote Sensing Data in Forest Inventory*. International Institute for Applied Systems Analysis. Online: <https://bit.ly/3AGan1U>.
- Barkhordarian, A. y col. (2019). «A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America». En: *Scientific reports* 9.1, 1-12. Online: <https://go.nature.com/37A2rCK>.
- Botequim, B. y col. (2017). «Coupling fire behaviour modelling and stand characteristics to assess and mitigate fire hazard in a maritime pine landscape in Portugal». En: *European Journal of Forest Research* 136.3, 527-542. Online: <https://bit.ly/3jPbwgA>.
- Botequim, B. y col. (2019). «Improving silvicultural practices for Mediterranean forests through fire behaviour modelling using LiDAR-derived canopy fuel characteristics». En: *International Journal of Wildland Fire* 28.11, 823-839. Online: <https://bit.ly/3iIoAFc>.
- Conver, J. y col. (2018). «Modeling fire pathways in montane grassland-forest ecotones». En: *Fire Ecology* 14.1, 17-32. Online: <https://bit.ly/2VIs69z>.
- Cuerpo de Bomberos DMQ (2018). *Plan de Prevención y Respuesta a Incendios Forestales 2018*. Cuerpo de Bomberos DMQ. Online: <https://bit.ly/3CMrgti>.
- DeMagalhães, S. y col. (2017). «Fire behaviour in different periods and configurations of a landscape in Northeastern Portugal». En: *Ciência Florestal* 27.2, 457-469. Online: <https://bit.ly/3jJz8TG>.
- Elia, M. y col. (2015). «Developing custom fire behavior fuel models for Mediterranean wildland-urban interfaces in southern Italy». En: *Environmental management* 56.3, 754-764. Online: <https://bit.ly/3yDpA2Z>.
- Finney, M. (2006). «An overview of FlamMap fire modeling capabilities». En: *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*, 213-220.
- Fitch, R. y col. (2018). «Changes in potential wildland fire suppression costs due to restoration treatments in Northern Arizona Ponderosa pine forests». En: *Forest policy and economics* 87, 101-114. Online: <https://bit.ly/3yIPK4z>.
- Government of Canada (2020). «Fire management». Online: <https://bit.ly/2UcarGP>.
- Govil, K. y col. (2020). «Preliminary results from a wildfire detection system using deep learning on remote camera images». En: *Remote Sensing* 12.1, 1-15. Online: <https://bit.ly/37B8dny>.
- Hernández, L. y col. (2007). «Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata». En: *Applied mathematical modelling* 31.6, 1213-1227. Online: <https://bit.ly/3m3TXMv>.
- Jahdi, R. y col. (2016). «Evaluating fire modelling systems in recent wildfires of the Golestan National Park, Iran». En: *Forestry* 89.2, 136-149. Online: <https://bit.ly/2Ue6EZL>.
- Jahdi, R. y col. (2019). «Fire modelling to assess spatial patterns of wildfire exposure in Ardabil, NW Iran». En: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 577-581. Online: <https://bit.ly/3m02DU0>.
- Jakubowski, M. y col. (2013). «Predicting surface fuel models and fuel metrics using Lidar and CIR imagery in a dense, mountainous forest». En: *Photogrammetric Engineering y Remote Sensing* 79.1, 37-49. Online: <https://bit.ly/37CGHpA>.
- MAAE (2020). «Mapa interactivo». Accessed: 5 October 2020. Online: <https://bit.ly/3swh6Ze>.
- MAGAP (2015). *Memoria tecnica DMQ - Proyecto Cartografía Temática Escala 1:25000*.
- Moore, P. y col. (2003). «Forest and wildfires: fixing the futures by avoiding the past». En: XII

- World Forestry Congress. Online: <https://bit.ly/3mlEnfl>.
- Mujtaba, T. y M. Wani (2018). «Object detection from satellite imagery using deep learning». En: *5th IEEE international conference on computing for sustainable global development*.
- NASA (2021). «FIRMS». Online: <https://go.nasa.gov/3AR0zlw>.
- Palaiologou, P. y col. (2020). «Development of comprehensive fuel management strategies for reducing wildfire risk in Greece». En: *Forests* 11.8, 789. Online: <https://bit.ly/3yVgkXW>.
- Rigolot, E. y col. (2004). «Recommendations for fuel-break design and fuel management at the wildland urban interface: an empirical approach in south eastern France». En: *Institute of Mediterranean forest ecosystems and forest products warm international workshop, Athènes*, 131-142. Online: <https://bit.ly/3CJlMrX>.
- Rios, O. y col. (2019). «A data-driven fire spread simulator: Validation in Vall-Llobrega's fire». En: *Frontiers in Mechanical Engineering* 5, 1-11. Online: <https://bit.ly/2VM5dlC>.
- Scott, J. y R. Burgan (2005). *Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR. Online: <https://bit.ly/3CJtGc9>.
- Secretaría de Seguridad DMQ (2015). «Atlas de amenazas naturales y exposición de infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito». Online: <https://bit.ly/37AHasF>.
- Shinneman, D. y col. (2019). «The ecological uncertainty of wildfire fuel breaks: examples from the sagebrush steppe». En: *Frontiers in Ecology and the Environment* 17.5, 279-288. Online: <https://bit.ly/2UfIJ6>.
- Srivastava, A. y col. (2018). «A simulation study to estimate effects of wildfire and forest management on hydrology and sediment in a forested watershed, Northwestern US». En: *Transactions of the ASABE* 61.5, 1579-1601. Online: <https://bit.ly/3jPK5TS>.
- Stefanidou, A. y col. (2020). «LiDAR-based estimates of canopy base height for a dense uneven-aged structured forest». En: *Remote Sensing* 12.10, 1565. Online: <https://bit.ly/3jJleQk>.
- Stratton, R. (2009). *Guidebook on LANDFIRE Fuels Data Acquisition, Critique, Modification, Maintenance, and Model Calibration*. Critique.
- Xofis, P. y col. (2020). «Integrating remote sensing methods and fire simulation models to estimate fire hazard in a south-east Mediterranean protected area». En: *Fire* 3.3, 31. Online: <https://bit.ly/37GnKT0>.
- Zigner, K. y col. (2020). «Evaluating the ability of farsite to simulate wildfires influenced by extreme, downslope winds in Santa Barbara, California». En: *Fire* 3.3, 29. Online: <https://bit.ly/3xHXguY>.



INTERACCIONES ENTRE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR, DENSIDAD DEL DOSEL Y PRECIPITACIÓN EFECTIVA DE UN BOSQUE DE *POLYLEPIS RETICULATA* UBICADO EN UN ECOSISTEMA DE PÁRAMO

INTERACTIONS BETWEEN LEAF AREA INDEX, CANOPY DENSITY AND EFFECTIVE PRECIPITATION OF A *POLYLEPIS RETICULATA* FOREST LOCATED IN A PARAMO ECOSYSTEM

Amanda Suqui^{1,2} , Rolando Céleri^{1,2} , Patricio Crespo^{1,2}  y Galo Carrillo-Rojas^{*1,3} 

¹Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, 010107, Cuenca, Ecuador.

²Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, 010107, Cuenca, Ecuador.

³Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, 010107, Cuenca, Ecuador.

*Autor para correspondencia: galo.carrillo@ucuenca.edu.ec

Manuscrito recibido el 27 de noviembre de 2020. Aceptado, tras revisión, el 22 de marzo de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

La medición de la cobertura vegetal es fundamental para conocer qué porcentaje de la precipitación queda interceptada sobre la misma. Las técnicas más utilizadas para medir la cobertura *in situ* son el índice de área foliar (IAF) y la densidad del dosel (DD). Sin embargo, no se ha puesto atención en las diferencias registradas en el uso de las dos técnicas ni cómo estas variables influyen sobre el balance hidrológico particularmente sobre la precipitación efectiva (PE). Por tal motivo, el objetivo del estudio es evaluar la relación entre las mediciones de la cobertura vegetal realizadas por los métodos de IAF y DD e identificar cómo se relacionan con la PE, importante para aplicaciones hidrológicas. El estudio se desarrolló en un bosque de *Polylepis reticulata* de 15633 m², ubicado en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay, sur de Ecuador, en un rango altitudinal de 3765 a 3809 m s.n.m. El IAF se midió con el equipo CI-110 Plant Canopy Imager y la DD con un densiómetro esférico, cubriendo un amplio rango de valores de cobertura de dosel. Para medir la PE se instrumentó el sitio de estudio con 9 pluviógrafos. Los resultados indican que el IAF y DD son en promedio 2,43 m² m⁻² y 88%, respectivamente; cuya relación resulta ser significativa ($R^2 = 0,913$; $p < 0,05$). La PE media anual es de 773,2 mm, que tiende a disminuir con el incremento del IAF y DD; aunque su relación resulta estadísticamente no significativa (valores $p > 0,05$). Este estudio muestra la importancia de caracterizar la cobertura vegetal para entender la interacción con la PE.

Palabras clave: *Polylepis reticulata*, índice de área foliar, densidad del dosel, precipitación efectiva.

Abstract

The measurement of vegetation cover is fundamental to quantify the precipitation percentage intercepted by it. The most widely techniques used to measure the cover *in situ* are the leaf area index (LAI) and the canopy density (CD). However, no attention has been paid to the differences recorded in the use of the two techniques or how these variables influence the hydrological balance on the throughfall (TF). For this reason, the objective of the study is to evaluate the relationship between vegetation cover measurements conducted by the LAI and CD methods and to identify how they relate with the TF, important for hydrological applications. The study was developed in a *Polylepis reticulata* forest of 15633 m², located at the Zhurucay Ecohydrological Observatory, south of Ecuador, in an altitudinal range of 3765 to 3809 m.a.s.l. The LAI was measured with the CI-110 Plant Canopy Imager equipment and CD with a spherical densiometer, covering a wide range of canopy cover values. The study site was instrumented with 9 tipping-bucket rain gauges to measure TF. The results indicate that LAI and CD averages are 2.43 m² m⁻² y 88 % respectively; whose relationship is significant ($R^2 = 0.913$; $p < 0.05$). Mean annual TF is 773.2 mm, which tends to decrease with the increase of the LAI and CD; although, their relationship is not statistically significant ($p\text{-value} > 0.05$). This study shows the importance of characterizing the vegetation cover to understand the interaction with TF.

Keywords: *Polylepis reticulata*, leaf area index, canopy density, throughfall.

Forma sugerida de citar: Suqui, A., Célleri, R., Crespo, P. y Carrillo-Rojas, G. (2021). Interacciones entre índice de área foliar, densidad del dosel y precipitación efectiva de un bosque de *Polylepis reticulata* ubicado en un ecosistema de páramo. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 34(2):63-79. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.04>.

IDs Orcid:

Amanda Suqui: <http://orcid.org/0000-0002-9776-3033>

Rolando Célleri: <http://orcid.org/0000-0002-7683-3768>

Patricio Crespo: <http://orcid.org/0000-0001-5126-0687>

Galo Carrillo-Rojas: <https://orcid.org/0000-0003-4410-6926>

1 Introducción

La cobertura vegetal es un factor clave para comprender los ecosistemas tanto desde el punto de vista hidrológico y ecológico, pues desempeña un papel significativo en las relaciones bosque-agua (Levia y col., 2011), como en la transformación de energía solar en producción primaria (Hernández, Granados y Sánchez, 2003). De hecho, los bosques al presentar una amplia cobertura del dosel y alta rugosidad aerodinámica provocan altas tasas de evaporación potencial (Gerrits, Pfister y Savenije, 2010). Esto quiere decir que la densidad de la cobertura, índice de área foliar, ángulo de inclinación y forma de las hojas inciden sobre los procesos hidrológicos como la intercepción (Crockford y Richardson, 2000; Fleischbein y col., 2005; Gerrits, 2010; Levía y col., 2011), evaporación, precipitación efectiva, e infiltración. La distribución heterogénea del dosel afecta la disposición de agua dentro del área forestal; en otras palabras, en algunos lugares dentro del bosque la lluvia puede alcanzar el suelo en mayor cantidad que en otros, pudiendo exceder la cantidad de precipitación bruta (Gerrits, 2010), debido a que el dosel y la estructura de las ramas canalizan la lluvia formando puntos de goteo que causan mayor intensidad de precipitación efectiva local (Germer, Elsenbeer y Moraes, 2006; Gerrits, 2010).

Uno de los bosques más emblemáticos de los altos Andes son los bosques de *Polylepis*, los cuales se observan como ecotonos dispersos en el límite arbóreo. Aparecen en un rango altitudinal de 3000 a 5000 m s.n.m., especialmente en lugares protegidos por rocas o a lo largo de las riveras de los ríos (Domic, Camilo y Capriles, 2014), bajo condiciones ambientales extremas; el clima y la topografía han marcado la existencia de estos bosques como pequeños parches aislados (Renison y col., 2006; Rangel y Arellano, 2010). Bosques que por su alto endemismo son sensibles a cambios (Gareca y col., 2010), encontrándose dentro del grupo de ecosistemas con mayor amenaza (Herzog y col., 2002). Por lo que es importante conocer su aporte en el balance hídrico dentro del páramo, puesto que la vegetación forestal es capaz de interceptar mayor cantidad de agua que el pajonal, inclusive la que proviene de la neblina (Nisbet, 2005).

Es esencial la caracterización del dosel forestal dado que juega un papel fundamental en la parti-

ción de la precipitación bruta (precipitación efectiva, escorrentía cortical e intercepción) (Levia y Herwitz, 2005; Johnson y Lehmann, 2006; Park y Cameron, 2008), en el control de la evaporación y almacenamiento de agua (Levia y col., 2011). Además, una descripción detallada del dosel ha facilitado la predicción de las pérdidas de agua por intercepción (Moličová y Hubert, 1994). Existen dos métodos básicos de medición: a) el índice de área foliar (IAF) se refiere a la unidad de superficie ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) del suelo que se encuentra cubierto por la proyección vertical del dosel o área de las hojas (Jennings, Brown y Sheil, 1999), b) densidad del dosel (DD) o cierre del dosel (%) es la proporción observada desde un punto único del hemisferio del cielo oscurecido por la vegetación (Jennings, Brown y Sheil, 1999). Las mismas que difieren según el tipo de bosque, densidad, distribución espacial de los árboles, tipo y estructura de copa, estado fenológico de las especies, edad y tipo de manejo (Lieberman, Lieberman y Peralta, 1989; Pukkala y col., 1991). En el caso de bosques de *Polylepis* estas variables han sido determinadas como parte de investigaciones. Por ejemplo, el IAF ha sido asociada a estudios de caída y descomposición de hojarasca (Pinos y col., 2017). Mientras, la DD ha permitido identificar: el efecto de la cobertura del dosel en la dinámica de las plantas (Cierjacks y col., 2007), su influencia en la avifauna (Tinoco y col., 2013) o la complejidad estructural del paisaje (Renison, Hensen y Suarez, 2011). Puesto que un sin número de estudios se han enfocado en temas como: su distribución en la Cordillera de los Andes (Gosling y col., 2009), historia y causas de fragmentación (Kessler, 2002; Hoch y Körner, 2005; Valencia y col., 2018), características morfológicas (Montalvo y col., 2018), composición florística, y problemas de regeneración (Domic, Camilo y Capriles, 2014; Morales y col., 2018) con la finalidad de entender y conocer las diferencias morfológicas entre especies de *Polylepis*; así también, conocer las condiciones ecológicas, climáticas en las que estos bosques se desarrollan y actividades que a través del tiempo han causado su fragmentación.

A escala de dosel ocurre dos procesos hidrológicos tan importantes como la precipitación: a) precipitación efectiva (PE) es la cantidad de agua que llega al suelo atravesando el dosel y/o la que cae por goteo después de haber estado en contacto con el follaje (Levia y Frost, 2006), y b) la intercepción es el agua retenida por hojas y ramas de la vegeta-

ción, reduciendo la cantidad de agua que alcanza el suelo (Gerrits, 2010). Las propiedades del evento de lluvia también inciden sobre estos procesos (Crockford y Richardson, 2000; Murakami, 2006); por ejemplo, una sucesión de eventos con intervalos de periodo seco puede interceptar más agua que una tormenta, ya que parte del agua retenida en el dosel se vacía por evaporación, generando espacio para mayor almacenamiento (Levia y col., 2011). Algunos autores han encontrado que la PE varía de 60 a 95% de la precipitación bruta (Germer, Elsenbeer y Moraes, 2006; Zimmermann, Wilcke y Elsenbeer, 2007; Berger y col., 2008; Brauman, Freyberg y Daily, 2010), mientras la intercepción puede representar una variación del 10 al 50% de la misma (Zhang y col., 2006; Roth, Slatton y Cohen, 2007). Esta variabilidad afecta la infiltración, escorrentía, caudal y almacenamiento de agua; procesos consecutivos para completar el ciclo hidrológico (Tsiko y col., 2012). Escasos estudios han mostrado el rol de los bosques de *Polylepis* en la hidrología como el realizado por Alfaro (2015) en Perú y el de Harden y col. (2013) en Ecuador, que indican la influencia de bosques de *Polylepis racemosa* (especie introducida y con manejo) sobre la infiltración de agua en el suelo. Investigaciones sobre la precipitación efectiva y la intercepción de agua en el dosel han puesto mayor énfasis en bosques alto andino (Ramos Franco y Armenteras, 2019), bosques montano bajo (Fleischbein y col., 2005; Wullaert y col., 2009), bosques montano tropical (Zimmermann, Wilcke y Elsenbeer, 2007; Gomez y col., 2008) y bosque tropical templado (Oyarzún y col., 2011), facilitando la comprensión del balance hidrológico.

En síntesis, existe muy poca información sobre la relación entre las características del dosel y estas a su vez con la cantidad de agua que alcanza el suelo en bosques altoandinos y más aún en bosques que se encuentran en el límite arbóreo, por lo que se desconoce el rol de la cobertura vegetal de los bosques de *Polylepis* en los procesos hidrológicos que se dan a escala de dosel. Por este motivo, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la relación entre las mediciones de la cobertura vegetal realizadas por los métodos de IAF y DD e identificar como se relaciona con la PE, lo cual es importante para las aplicaciones hidrológicas.

2 Materiales y Métodos

2.1 Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay donde existe un bosque de *Polylepis* de 15633 m², que se encuentra en un rango altitudinal de 3765 a 3809 m s.n.m., con pendientes que varían de 10 a 50%. La especie vegetal dominante es *Polylepis reticulata*, encontrando otras especies arbóreas como *Escallonia myrtiloides*, *Oreopanax sp.*, *Weinmannia sp.*, *Gynoxys sp.*, especies de la familia de las Melastomataceae y arbustos como *Valeriana sp.* Los árboles de *Polylepis reticulata* pueden alcanzar una altura de 15 m, presentan troncos tortuosos con varias ramificaciones, un diámetro altura al pecho de 33,58 cm y un área basal de 925,64 cm². Las hojas son alternas que miden hasta 2,5 cm de largo y crecen conglomeradas en las puntas de las ramas, están conformadas por 3 o 5 foliolos elípticos.

El clima está influenciado por el régimen de humedad del Pacífico y masas de aire continentales que provienen de la cuenca del Amazonas (Córdova, Carrillo y Célleri, 2013). La precipitación interanual se caracteriza por ser altamente uniforme, siendo ligeramente mayor en los meses de Enero a Julio; la precipitación media anual es de 1300 mm (Ochoa, Crespo y Célleri, 2018). La precipitación ocurre frecuentemente como llovizna que representa el 80% de los días lluviosos (Padrón y col., 2015). El rango medio de temperatura diaria es de 0,4 °C a 14,2 °C, con promedio anual de 6,1 °C. La humedad relativa promedio anual es de 93,6%. El nivel de radiación solar es de 4942 MJm⁻² año⁻¹ con una media diaria de 13,73 MJ m⁻² día⁻¹. La velocidad del viento sigue un patrón estacional con una media mensual de 3,21 m s⁻¹ para los meses de Octubre a Marzo y 4,77 m s⁻¹ de Junio a Septiembre (Carrillo y col., 2019). Esta zona presenta una evapotranspiración de referencia anual de 723 mm a una altitud de 3780 m s.n.m. (Córdova y col., 2015) y una evapotranspiración actual anual (Eta) de 622 mm (tasa media diaria de 1,7 mm) (Ochoa y col., 2019).

2.2 Diseño del estudio

Para la ubicación de los sitios para la medición de la PE, IAF y DD dentro del bosque de *Polylepis* se realizaron varias actividades:

1. El área del bosque fue dividida en una grilla de 20 m × 20 m para determinar en cada punto de intersección el porcentaje de DD (proporción de cielo cubierto por la vegetación) con un densiómetro esférico cóncavo a la altura de los codos (1,20 m sobre el suelo) y a una distancia de 30 cm del operador, método que se describe en la sección 3.2.
2. Con los valores obtenidos se caracterizó la variabilidad espacial de la DD del bosque. Para identificar la mejor caracterización se usaron varios métodos de interpolación y se analizaron los errores de cada uno; los métodos usados fueron: Kriging ordinario (modelo esférico), ponderación de distancia inversa (IDW) y polígonos de Thiessen.
3. Se identificó la ubicación espacial de 9 sitios de muestreo distribuidos en valores bajos, medios y altos de DD, considerando a su vez el efecto de borde (Figura 1).

2.3 Medición de la densidad del dosel

Una vez establecidos los sitios de muestreo para la medición de la PE se midió el porcentaje de DD sobre cada pluviógrafo. Para determinar esta variable se utilizó un densiómetro esférico constituido por un nivel de burbuja y un espejo cóncavo dividido por una grilla de 24 celdas cuadradas que refleja la luz incidente en un ángulo de 180°. Cada lectura consiste en la subdivisión mental de cada celda en 4 cuadrados que se representan mediante un punto imaginario en el centro, dando un total de 96 puntos centrales, que al encontrarse cubiertos por el reflejo de la cobertura vegetal son contabilizados. Se obtuvo un valor promedio de cuatro lecturas por sitio (dirección de los puntos cardinales), el mismo que para obtener el porcentaje de dosel se multiplica por 1,04 ($1/96 \times 100$) (Lemmon, 1956; Lemmon, 1957; Cook y col., 1995).

2.4 Medición del índice de área foliar

La medición de IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) se realizó en cada sitio donde fue medida la DD. Se usó el equipo óptico CI-110 Plant Canopy Imager, que consiste de una cámara de 8 megapíxeles equipada con un lente hemisférico (ojo de pez) de un ángulo de 170°. El software se basa en el cálculo de la fracción del

cielo visible bajo el dosel utilizando el procedimiento de Gap-Fraction Inversion (Norman y Campbell, 1989), de acuerdo a tres ecuaciones principales: coeficiente de transmisión para el ingreso de radiación difusa, coeficientes de extinción del dosel (IAF) y el ángulo medio de inclinación del follaje. Las imágenes del dosel se fraccionan en divisiones cenital y azimutal (sectores de dosel). La fracción de cielo (coeficiente de transmisión del haz solar) visible en cada división se analiza contando la porción de cielo de los píxeles de la imagen. Entonces, el equipo captura imágenes de amplio ángulo del dosel mientras estima el IAF y mide los niveles de radiación fotosintéticamente activa (PAR) por sitio de muestreo. Las imágenes se actualizan en vivo en el monitor incorporado, proporcionando datos instantáneos para verificación y análisis con el software integrado. El IAF se representa por valores que varían de 0 a 10, donde 0 equivale a un área sin dosel o suelo desnudo y 10 representa un dosel denso (Bio-Science, 2016). Las condiciones óptimas del cielo para las mediciones deben ser bajo una cubierta uniforme de nubes durante la mañana o al final de la tarde (cantidad de radiación baja) (Bio-Science, 2016).

2.5 Medición de precipitación efectiva

Para medir la PE se instalaron 9 pluviógrafos automáticos de resolución de 0,2 mm a una altura sobre el suelo de 1,20 m. Los pluviógrafos fueron calibrados *in situ* y sobre cada uno se colocó una malla plástica para recoger la hojarasca y así evitar su taponamiento. La descarga de datos, mantenimiento y limpieza de los equipos instalados se realizó semanalmente a partir del 9 de Marzo de 2019 hasta el 8 de Marzo de 2020.

Los registros fueron agregados para tener una base de datos con frecuencia de 5 minutos. La cantidad de PE obtenida corresponde a la acumulación diaria y anual de los valores registrados por los pluviógrafos en cada punto de muestreo dentro del bosque. En caso de pérdida de datos por falla en la descarga o por taponamiento, se realizó un relleno de datos diarios mediante el método de regresión lineal de los valores del pluviógrafo que presentó pérdida de datos con el pluviógrafo que mostró la mejor correlación.

2.6 Relación entre DD, IAF y PE.

Primero se comparó la DD con el IAF mediante correlación por el método de Pearson, con el objeto de conocer si estas dos variables muestran la mis-

ma información con respecto a la cobertura del dosel. Luego se realizaron correlaciones y regresiones lineales de la DD y el IAF con la PE para conocer qué variable permite identificar la variabilidad de la PE referente al dosel del bosque.

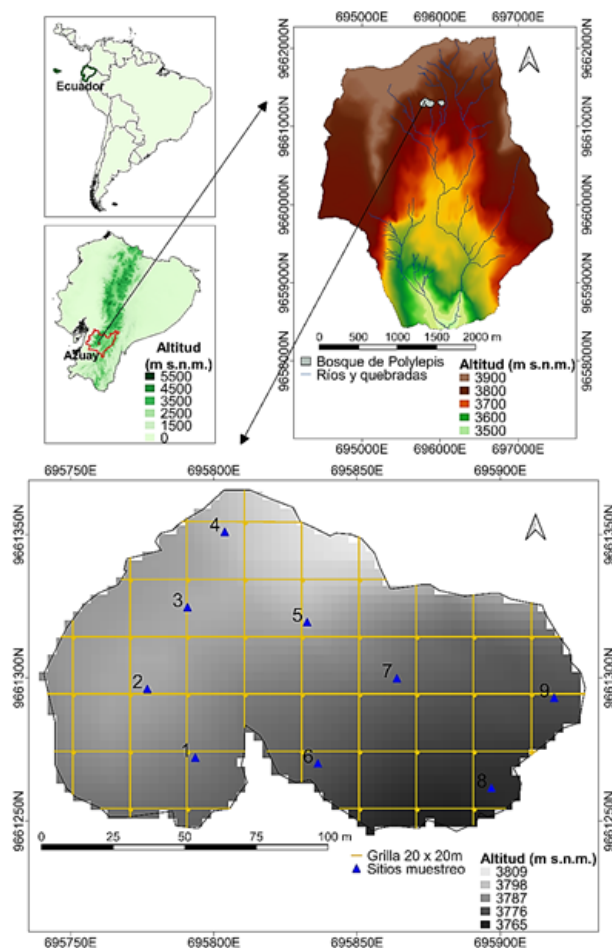


Figura 1. Área de estudio localizada en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay al Sur de Ecuador.

3 Resultados

3.1 Densidad del dosel

La variabilidad espacial del dosel modelada demostró mejor ajuste y fidelidad con las características del terreno al emplear interpolación por el método de Kriging que con respecto a IDW y a Polígonos de Thiessen (37 puntos, grilla 20 × 20 m). Tal método se ajustó de mejor manera a los datos, presentando los errores más bajos.

En la Figura 2 se observa que la DD del bosque de *Polylepis* presenta un rango de variación espacial entre 62,5% hasta 95,2%. En ciertas zonas predominan valores entre 87 a 91 %, que representan aproximadamente un área de 550 m².

Como se indicó en la sección 3.4, se consideraron 9 sitios de muestreo para PE, donde se midió la DD e IAF (Figura 2). En la Figura 3 se observa que el porcentaje de DD en los 9 sitios varía en un rango

de 79% (sitio 1) a 96% (sitio 5). El valor promedio del porcentaje de DD fue de $88 \pm 5,8\%$. El coeficien-

te de variación resultó bajo, sin superar el 10%, lo cual indica homogeneidad en los datos.

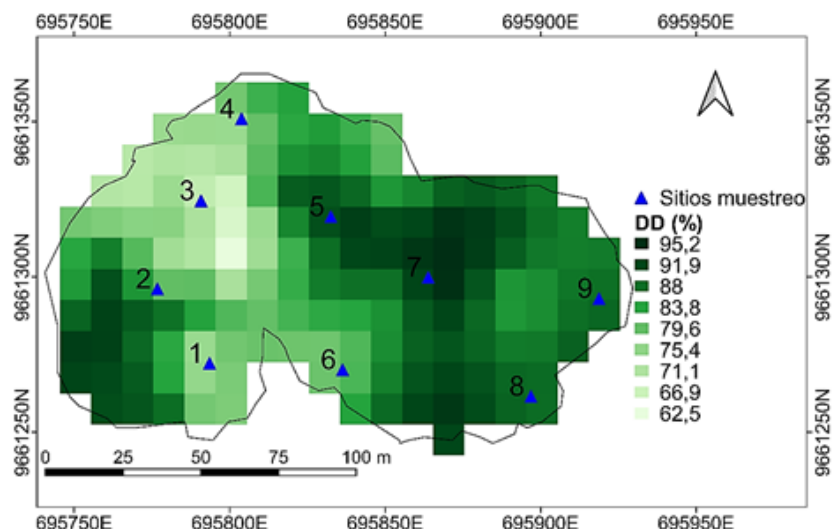


Figura 2. Variabilidad espacial de la densidad del dosel por el método de interpolación Kriging y sitios de muestreo de precipitación efectiva.

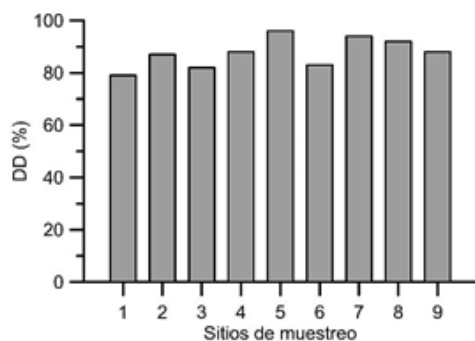


Figura 3. Porcentaje de densidad de dosel.

3.2 Índice de área foliar

Tal como se muestra en la Figura 4 el IAF estimado en los 9 sitios de muestreo varía entre $2,05 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (sitio 1) y $2,79 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (sitio 5), con un promedio de $2,43 \pm 0,25 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. De manera análoga con la DD, el coeficiente de variación fue de 10%, confirmando una baja variabilidad de IAF dentro del bosque.

3.3 Precipitación efectiva

Se encontró que el pluviógrafo del sitio 2 presentó el mayor porcentaje de datos perdidos de PE con

un 3,6% de datos a rellenar; cabe recalcar que este procedimiento no afectó los resultados debido a que no sobrepasa el límite aceptable de valores perdidos (10%).

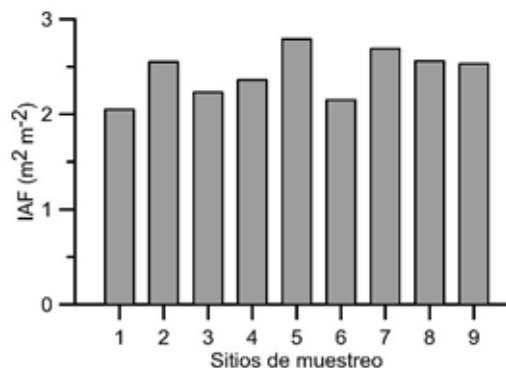


Figura 4. Índice de área foliar.

La PE media anual estimada mediante pluviógrafos en 9 sitios del bosque de *Polylepis* fue de $773,2 \text{ mm año}^{-1} \pm 212,6$ con una media diaria de $2,1 \pm 0,58 \text{ mm día}^{-1}$ (Tabla 1). La cantidad anual de PE varía entre $484,9$ a $1191,6 \text{ mm año}^{-1}$, y la cantidad media diaria anual presentó una variación de $1,3$ a $3,3 \text{ mm día}^{-1}$, valores que corresponden al sitio 9 y

1 respectivamente (Tabla 1 y Figura 5).

El coeficiente de variación tanto para valores acumulados anual como para valores de media diaria anual de todos los sitios representa el 28% de variabilidad. Al analizar la PE diaria anual en cada sitio de muestreo se observa que los datos reportan un CV de 160% (sitio 1) hasta 180% (sitios 2, 5 y 8),

lo que indica que la PE en el bosque en estudio presenta alta heterogeneidad.

En la Figura 5 se observa que los diagramas de caja para los sitios de estudio presentan valores atípicos que se concentran sobre el límite superior, posiblemente como respuesta a eventos particulares de precipitación, que en este caso son eventos diarios que superan los 10 mm.

Tabla 1. Precipitación efectiva (PE) acumulada anual, media diaria anual, desviación estándar (σ) diaria anual y coeficiente de variación (CV) diario anual.

Sitio de muestreo	PE anual (mm año ⁻¹)	PE media diaria anual (mm día ⁻¹)	σ diaria anual	CV diario anual (%)
1	1191,6	3,3	5,2	160
2	825,4	2,3	4,1	180
3	694,5	1,9	3,2	170
4	743,0	2,0	3,5	170
5	592,7	1,6	2,9	180
6	862,5	2,4	4,1	170
7	944,9	2,6	4,7	180
8	619,1	1,7	2,9	170
9	484,9	1,3	2,3	170
\bar{x}	773,2	2,1		
σ	212,6	0,58	3,8	
CV	28	28		180

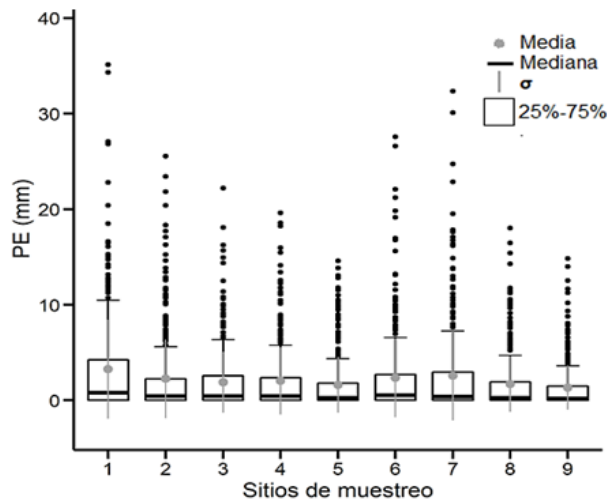


Figura 5. Precipitación efectiva diaria.

3.4 Relación entre DD, IAF y PE

Como se esperaba, la correlación entre el IAF y la DD es altamente significativa con un valor $p < 0,05$

y un coeficiente R^2 de 0,913. En la Figura 6 se observa que la DD tiende a incrementar con el aumento del IAF.

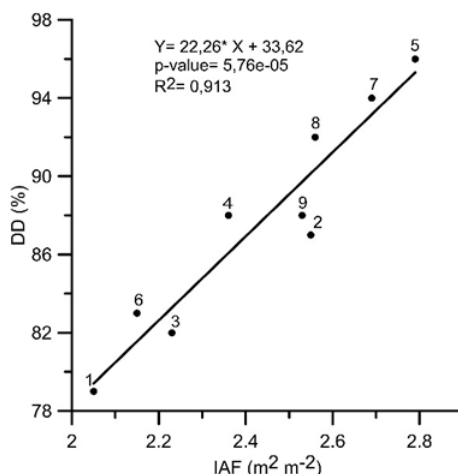


Figura 6. Relación entre índice de área foliar (IAF) y densidad del dosel (DD) (1-9 sitios de muestreo).

Los coeficientes de correlación indican la existencia de una relación inversa entre las variables de cobertura vegetal (IAF y DD) con la PE, reportando valores de $-0,535$ y $-0,524$ respectivamente; como se esperaba, la PE tiende a disminuir con el incremento de la DD o IAF (Figura 7). Sin embargo, los

valores $p > 0,05$ indican que la relación resulta ser no significativa. Al aplicar el método de regresión lineal se encontró coeficientes R^2 bajos de 0,286 y 0,275 que indican la poca dependencia o respuesta de la PE a estas variables de cobertura del dosel.

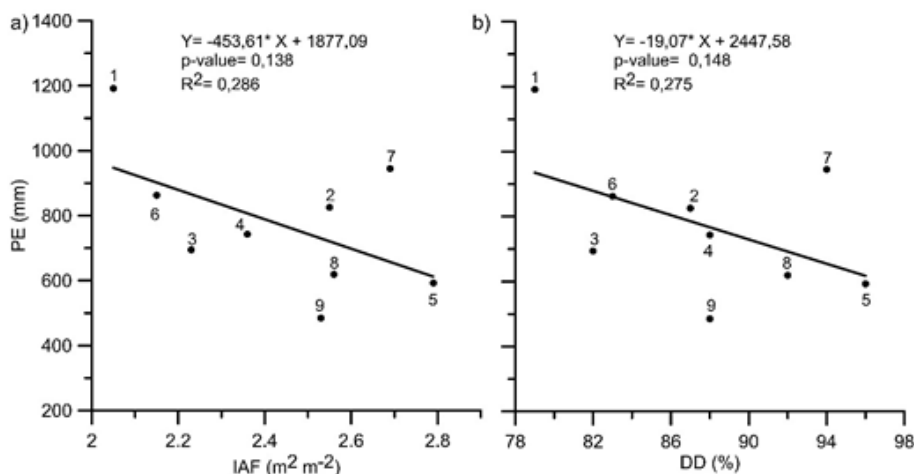


Figura 7. Relación entre a) índice de área foliar (IAF), b) densidad del dosel (DD) con la precipitación efectiva (PE) (1-9 sitios de muestreo).

4 Discusión

La información sobre el IAF, DD, PE y la relación existente entre tales variables para el bosque de *Polylepis reticulata* analizado, se convierte en información importante para los bosques altoandinos; facilita la comprensión y sienta una línea base sobre el rol que tiene la vegetación en procesos hidrológicos que suceden en bosques de páramo.

4.1 Caracterización de la cobertura del dosel

Múltiples investigaciones realizadas en bosques de ecosistemas andinos revelan valores de IAF y DD (Tabla 2). Tales estudios también caracterizan la cobertura del dosel y la relación con diferentes funciones ecológicas.

Tabla 2. IAF y DD de bosques localizados en ecosistemas andinos.

Ecosistema y tipo de bosque	Sitio de estudio y elevación (m s.n.m.)	Medición IAF (m ² m ⁻²)	Medición DD (%)	Referencia
Páramo: Bosque de <i>Polylepis reticulata</i>	Ecuador, Cuenca del Río Zhurucay, (3765 – 3809)	2,05 - 2,79	79 - 96	Presente estudio
Páramo: Bosque <i>Polylepis reticulata</i>	Ecuador, Parque Nacional Cajas, (3735 – 3930)	2,60 - 6,17		Pinos y col. (2017)
Páramo: Bosque de <i>Polylepis pauta e incana</i>	Ecuador, Papallacta, (3500 – 4100)		46,7 - 75	Cierjacks y col. (2007)
Páramo: Bosque de <i>Polylepis australis</i>	Argentina, Córdoba, (1400 – 2500)		8-72	Renison, Hensen y Suarez (2011)
Páramo: Plantación de pino	Ecuador, Azuay, (3500 – 3700)	0,23 - 2,22	5,5 - 74,7	Alvarado y Muñoz (2017)
Páramo: Plantación de pino	Ecuador, Azuay, (3600 – 3800)		19,3 - 64,8	Quiroz y col. (2019)
Páramo: Plantación de pino Bosque montano alto	Ecuador, Azuay, (3800 y 2500)	5,5 y 0,2		Jadán y col. (2019)
Bosques siempreverdes montano alto y bajo	Ecuador, Azuay, (2000 – 3800)	1,6 - 2,5	53 - 72	Alvarado y Cobos (2019)
Bosque montano bajo	Ecuador, Loja - Zamora, (1900 – 2000)	5,2 - 9,3		Fleischbein y col. (2005)
Bosque montano tropical	Ecuador, Loja, (1050 – 3060)	5,1 - 2,9		Moser, Hertel y Leuschner (2007)
Bosque montano tropical nublado	Perú, Parque Nacional Yanachaga-Chemillén, (2815 – 2468)	2,5 - 2,9	87,9 - 90,7	Gomez y col. (2008)

4.1.1 Estudios de índice de área foliar

Los valores de IAF del bosque de *Polylepis* estudiado se encuentran dentro de los valores inferiores reportados por Pinos y col. (2017) para bosques de *Polylepis reticulata* en el Parque Nacional Cajas, que presentan un IAF entre 2,60 a 6,17 m² m⁻² (media de 3,96 m² m⁻²). Esta diferencia puede deberse al método utilizado para la determinación del IAF, ya que el autor empleó área foliar específica y densidad de árboles por parcela de estudio. En estudios realizados en plantaciones de pino establecidas en ecosistemas de páramo, Alvarado y Muñoz (2017) reportan un rango de IAF de 0,23 a 2,22 m² m⁻² (media de 0,92 m² m⁻²), valores que resultan ser menores a los encontrados en este estudio, posiblemente debido a la forma de las hojas y densidad de la plantación. Así también, Jadán y col. (2019) registraron valores muy bajos de IAF (0,2 m² m⁻²) en plantaciones de similar especie y un IAF de 5,5 m² m⁻² en bosques montano alto, que resulta mayor a lo encontrado. En un estudio realizado en bosques siempreverdes montano alto y bajo localizados al sur de Ecuador, Alvarado y Cobos (2019) reportan resultados de IAF con una variabilidad menor a la del presente estudio. Fleischbein y col. (2005) indican que un bosque montano bajo al sur de Ecuador presenta un IAF entre 5,2 y 9,3 m² m⁻² (media de 7,3 m² m⁻²), valores más altos que los identificados en el presente estudio. Moser, Hertel y Leuschner (2007) en bosques montano tropical al sur de Ecuador, indican que al incrementar la altitud el tamaño de las hojas es menor; por consiguiente, el IAF disminuye. Gomez y col. (2008) en bosques montano tropical del Perú, encontraron que el IAF es de 2,5 ± 0,7 a 2,9 ± 0,2 m² m⁻², valores que resultan ser mayores a los encontrados en el bosque de *Polylepis*.

4.1.2 Estudios de densidad del dosel

Estudios realizados en *Polylepis* han determinado un porcentaje de DD; como es el caso del estudio desarrollado por Cierjacks y col. (2007) en bosques de *Polylepis pauta* e *incana*, en los que se encontró valores de 46,7% cerca del borde y de 65 - 75% en la parte interna del bosque, datos que resultan ser menores a los de nuestro estudio tanto cerca del borde (79, 83 y 88%; sitios 1, 6 y 9) como en la parte interna del bosque (94 - 96%; sitio 7 y 5). De igual manera, Renison, Hensen y Suarez (2011) en un bosque de *Polylepis australis* identificaron que la variabilidad

de DD es menor a la encontrada en el presente estudio con porcentajes de 8, 23, 54 y hasta un 72 %. Esto puede deberse a que los resultados de los estudios mencionados presentan un sesgo de subjetividad que los obtenidos en nuestro estudio, debido a que fueron determinados de forma visual, método que depende completamente de la experiencia del técnico. En plantaciones de pino ubicadas en ecosistemas de páramo, Alvarado y Muñoz (2017) reportan que estos bosques presentan un rango de DD de 5,5 a 74,7% (media de 44,5%). Al igual, Quiroz y col. (2019) en su investigación presenta porcentajes de DD (19,3% - 64,8%) menores a los encontrados en el sitio de estudio. En bosques siempreverdes montano alto y bajo localizados al sur de Ecuador, se registraron promedios de DD de 53 ± 4% y 72 ± 3,2% valores más bajos a los encontrados en el presente estudio (Alvarado y Cobos, 2019). El estudio realizado por Gomez y col. (2008), en un bosque montano tropical del Perú presenta similitudes en los valores de DD (87,9% ± 6,2 a 90,7% ± 1,6) con los datos reportados en el bosque de *Polylepis*.

De acuerdo a lo observado, la poca similitud tanto del IAF como del porcentaje de DD entre bosques, se debe a que tales variables dependen de condiciones propias del sitio, las que generalmente influyen sobre el desarrollo y características de cada especie arbórea. Parámetros influyentes son: El tamaño de hoja, densidad de árboles por unidad de superficie, arquitectura y estructura de ramas y la topografía; por lo que pueden variar significativamente de un sitio a otro, así se trate de la misma especie forestal.

La estrecha relación entre IAF y DD queda evidenciada mediante análisis de regresión, revelando una fuerte proporcionalidad entre ambas variables, lo que concuerda con el estudio realizado por Buckley, Isebrands y Sharik (1999), en el que reportan un R² de 0,93 y 0,99 en bosques de roble y pino, explicando que esto es debido a que los bosques de estudio presentan una estructura uniforme. Sin embargo, este autor también comenta que la relación entre las variables puede cambiar cuando existe diferencias entre las especies forestales, arquitectura de la copa y etapa de desarrollo.

4.2 Variabilidad de la precipitación efectiva y relación con la cobertura del dosel

En este estudio se evidenció que la PE dentro del bosque de *Polylepis* fue heterogénea. La literatura no reporta otro estudio de PE realizado en bosques de *Polylepis*. Estudios realizados en bosques tropicales premontano (Teale y col., 2014), bosque montano bajo (Fleischbein y col., 2005) y en un bosque mixto de roble (Staelens y col., 2006), también encontraron que la PE es muy variable. Estos estudios dan una posible explicación de que esta variable se encuentra influenciada por la arquitectura del dosel, características morfológicas de las hojas y en algunos casos por una mayor carga de epífitas sobre el dosel que pueden generar más puntos de goteo, lo que conlleva a una mayor variabilidad de PE. De igual manera el estudio realizado por Zimmermann, Wilcke y Elsenbeer (2007) explica que la variabilidad espacial depende principalmente de la complejidad del dosel y es influenciada por el número de especies por área, altura irregular, presencia de epífitas, edad, estructura y disposición de los árboles. Otra posible explicación es que la PE también depende de la profundidad de los eventos de precipitación, razón por la que la variabilidad espacial de PE incrementa, sugiriendo que los patrones espaciales del volumen de PE pueden ser independientes del ecosistema. Germer, Elsenbeer y Moraes (2006) y Roth, Slatton y Cohen (2007) muestran que existe características como la diversidad en las especies, el tamaño y la estructura de la vegetación que dan como resultado la distribución de la lluvia, los puntos de goteo y almacenaje localizado en el dosel inferior produciendo patrones espacialmente heterogéneos. Algo similar muestran Zimmermann, Zimmermann y Elsenbeer (2009) y Macinnis y col. (2014) en sus estudios, pues es la vegetación la que influye en el movimiento del agua a través del dosel, ya que ciertas formas o su distribución dentro del área forestal pueden crear puntos de goteo. Además, otros estudios como el de Zimmermann y col. (2008) indican que la PE se ve afectada por las condiciones antecedentes del dosel como es la humedad. En nuestro estudio, el coeficiente de variación diario anual resulta ser mayor que el acumulado anual. Carlyle y Price (2007) explican que cuando la PE se observa en una resolución temporal de menor agregación, como es el caso de una agregación diaria o por eventos, este valor se encuentra influenciado por las condiciones de intensidad de

la precipitación bruta, e incluso llega a depender de las condiciones del viento. El coeficiente de variación de la PE puede incrementar o disminuir cuando la intensidad de la lluvia es su principal factor de cambio (Weiqing y col., 2007).

A pesar que en el presente estudio las correlaciones encontradas entre las variables IAF, DD y la PE no se muestran estadísticamente significativas, los resultados evidencian una proporcionalidad inversa entre las variables de cobertura del dosel y la PE, lo que concuerda con previas investigaciones en las que reportan que, a medida que aumenta IAF, la PE tiende a disminuir (Llorens y Gallart, 2000; Loescher, Powers y Oberbauer, 2002; Nadkarni y Sumera, 2004). Del mismo modo, Holwerda, Scatena y Bruijnzeel (2006) indican que la PE en un bosque de Puerto Rico fue mayor en zonas con bajas cantidades de dosel, debido a que una superficie de dosel más pequeña se correlaciona con una menor cantidad de agua interceptada. En el estudio realizado por Fleischbein y col. (2005) se reporta una correlación negativa entre IAF y PE (Pearson $r = -0.49$) coeficiente ligeramente menor al encontrado en nuestro trabajo. Sin embargo, al comparar con la interceptación, Fleischbein y col. (2005) muestra que el IAF solamente explica el 12% de la variación, atribuyendo a que el área de cobertura vegetal medida sobre los colectores de PE es mayor al área del colector. De este modo, la diferencia de área de captura de los medidores de PE y el área cubierta por los equipos de IAF y DD podrían explicar la variabilidad de la interceptación, o en nuestro caso la variación de PE en valores similares de IAF y los bajos coeficientes de determinación entre las variables de cobertura de dosel con la PE. La comparación de los resultados con el estudio de Teale y col. (2014) en un bosque de Costa Rica, confirma que la relación entre IAF y PE es estadísticamente no significativa, probablemente debido a que las localidades con similar IAF pueden tener diferente configuración del tipo de hoja, cobertura de madera, orientación del follaje y ramas entre otras características que forman puntos de retención y puntos de goteo. Por tal razón, es claro que la vegetación influye en la forma en que el agua se mueve a través del dosel; si bien la PE generalmente es menor que la precipitación bruta, ciertos arreglos y formas de vegetación pueden crear puntos de goteo logrando exceder en gran medida a la precipitación. En general, los resultados de los estudios que intentaron relacionar

la cobertura del dosel o las características de la vegetación con la PE han sido débiles (Keim, Skaugset y Weiler, 2005). De igual manera lo indica Zimmermann, Zimmermann y Elsenbeer (2009), al hablar de la relación entre la apertura del dosel y la PE en los puntos de medición, donde se observa más débil a medida que aumenta la magnitud del evento de precipitación. En un estudio realizado por Molina y col. (2019) en bosques de pino y roble, indica que la PE no presenta una relación significativa cuando los valores de DD son menores al 60 %. Sin embargo, al incrementar esta variable en un rango de 60 a 100 % se observa un patrón significativo de disminución de la PE con el incremento de la DD, mostrando una correlación negativa de 0,51 y 0,61 respectivamente. Autores como Park y Cameron (2008) encontraron que existe una interacción entre los impactos que producen las características del dosel en la PE con la influencia de las características del evento de precipitación; sin embargo, mediante el análisis estadístico no se pudo identificar ningún patrón. (Levia y col., 2011) indica que los patrones espaciales de la PE varían notablemente entre ecosistemas por lo que no es posible identificar una relación entre el dosel y la PE.

Como anteriormente ha sido mencionado por varios autores, la posible explicación a la relación no significativa entre las variables de cobertura del dosel y la PE, es que este proceso hidrológico no depende solo de la DD o IAF, ya que existen otros factores tanto de la vegetación (estructura, arquitectura de las ramas, densidad, edad, ángulo de inclinación de las hojas) como climáticos (intensidad de la lluvia y viento).

Por otro lado, estudios realizados en bosques de caducifolios resaltan el efecto de la dinámica del follaje sobre la PE, debido a que presentan períodos notables de pérdida de hojas, siendo lo contrario en bosques perennifolios como es el caso de *Polylepis*. Sin embargo, es claro que su follaje presenta una dinámica que consiste en desfronde y renovación de las hojas, como lo indica Pinos (2014), reportando que bosques de *Polylepis* presentan tasas de desfronde de $0,61 \text{ año}^{-1}$ y el período de renovación foliar se da en 1,75 años. Por esta razón, esta dinámica debería ser tomada en cuenta para futuras investigaciones, con un mayor número de puntos de medición de cobertura del dosel, en diferentes épocas o temporadas del año.

5 Conclusiones

Este estudio es pionero en comparar mediciones de IAF y DD para su relación con la PE en bosques de *Polylepis*, que se caracterizan por ser parte de ecosistemas de páramo. El IAF y DD son variables que difieren de acuerdo a las condiciones a las que se encuentran expuestas las especies forestales durante su crecimiento, por ejemplo, nutrientes en el suelo, agua, viento, precipitación, temperatura. Así como de características propias de las especies que conforman el bosque como: forma y tamaño de la hoja, arquitectura y estructura de la ramificación, altura, edad, entre otras.

Se encontró una fuerte relación entre las variables de dosel medidas, que a su vez proporcionan similar información respecto a la cobertura, con lo cual se concluye que cualquiera de las dos técnicas podría ser utilizada para estimar la cobertura del dosel. Sin embargo, por su mayor comodidad, facilidad de operación y principalmente bajo costo, la técnica de medición del porcentaje de DD mediante el método del densiómetro esférico, resulta la más óptima para esta actividad.

Al estudiar la precipitación efectiva, uno de los principales procesos hidrológicos que se produce a nivel del dosel, se pudo constatar que no solo está influenciada por las variables antes mencionadas, pues es el conjunto de características y distribución de las especies forestales, lo que incrementa la complejidad vegetal dentro del bosque y a su vez la heterogeneidad de la PE. Además, mientras más fina es la resolución temporal usada en la estimación de la PE (diario, horario, minutos), posiblemente está influenciada por condiciones ambientales como son la intensidad y duración de la precipitación, viento, radiación solar, condiciones antecedentes sean secas o de humedad del dosel.

La relación no significativa entre IAF y DD con la PE, se puede atribuir a la diferencia de áreas de medición de las 2 variables (cobertura del dosel y precipitación), ya que el área que abarcan los colectores de lluvia, en este caso los pluviógrafos, es mucho menor al área proyectada por los equipos utilizados para medir la cobertura del dosel. Por lo tanto, las mediciones de la cobertura vegetal – con cualquiera de las dos técnicas – resultan limitadas para caracterizar apropiadamente la variabilidad de

la PE en el ecosistema estudiado.

Agradecimientos

El presente estudio es el resultado de la Maestría en Hidrología con mención en Ecohidrología del Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca. Este estudio se ejecutó en el marco del proyecto "The Ecohydrologic functions of *Polylepis* forests within the Andean páramo and their resilience and their vulnerability to climate change", financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) y la Universidad de New Hampshire. Un agradecimiento al Ing. Franklin Marín y Blgo. Aldemar Carabajo por la ayuda y apoyo brindado en las campañas de campo. Al Ing. Oswaldo Jadán de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca por la colaboración con los equipos para medir la cobertura del dosel.

Referencias

- Alfaro, G. (2015). «Caracterización de la infiltración en bosques de *Polylepis* spp., de 11 y 29 años, Parque Nacional Huascarán, Quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash». Tesis de grado. Perú: Universidad Agraria La Molina. Online: <https://bit.ly/3ooQaZh>.
- Alvarado, A. y L. Muñoz (2017). «Evaluación de la regeneración natural y su relación con la altitud y cobertura de dosel en plantaciones no manejadas de *Pinus patula* en zonas alto Andinas, en la provincia del Azuay». Tesis de grado. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Online: <https://bit.ly/3ol1YvI>.
- Alvarado, I. y C. Cobos (2019). «Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos en el macizo del Cajas, Azuay-Ecuador». Tesis de grado. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Online: <https://bit.ly/3yc33dL>.
- Berger, T. y col. (2008). «Throughfall fluxes in a secondary spruce (*Picea abies*), a beech (*Fagus sylvatica*) and a mixed spruce-beech stand». En: *Forest Ecology and Management* 255.3-4, 605-618. Online: <https://bit.ly/3ftBtQD>.
- Bio-Science (2016). *Manual CI-110 / 120 Plant Canopy Imager*.
- Brauman, K., D. Freyberg y G. Daily (2010). «Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i». En: *Agricultural and Forest Meteorology* 150.2, 265-275. Online: <https://bit.ly/3ot1jrY>.
- Buckley, D., J. Isebrands y T. Sharik (1999). «Practical field methods of estimating canopy cover, PAR, and LAI in Michigan oak and pine stands». En: *Northern Journal of Applied Forestry* 16.1, 25-32. Online: <https://bit.ly/3brumXW>.
- Carlyle, D. y A. Price (2007). «Modelling canopy interception loss from a Madrean pine-oak stand, northeastern Mexico». En: *Hydrological Processes: An International Journal* 21.19, 2572-2580. Online: <https://bit.ly/2Rdx7Fr>.
- Carrillo, G. y col. (2019). «The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador». En: *Agricultural and Forest Meteorology* 265, 30-47. Online: <https://bit.ly/2SS1odg>.
- Cierjacks, A. y col. (2007). «Impact of sowing, canopy cover and litter on seedling dynamics of two *Polylepis* species at upper tree lines in central Ecuador». En: *Journal of Tropical Ecology*, 309-318. Online: <https://bit.ly/3hwP78i>.
- Cook, J. y col. (1995). «Spherical densimeters produce biased estimates of forest canopy cover». En: *Wildlife Society Bulletin* 23.4, 711-717. Online: <https://bit.ly/3uTrieF>.
- Córdova, M., G. Carrillo y R. Céleri (2013). «Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de Páramo Andino debidos al uso de datos mensuales, diarios y horarios». En: *Aqua-LAC* 5.2, 14-22. Online: <https://bit.ly/3fem8mM>.
- Córdova, M. y col. (2015). «Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data». En: *Mountain Research and Development* 35.3, 230-239. Online: <https://bit.ly/3bplNwH>.
- Crockford, R. y D. Richardson (2000). «Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate». En: *Hydrological processes* 14.16-17, 2903-2920. Online: <https://bit.ly/3buU0ei>.
- Domic, A., G. Camilo y J. Capriles (2014). «Small-scale Farming and Grazing Reduce Regeneration of *Polylepis tomentella* (Rosaceae) in the Se-

- miarid Andes of Bolivia». En: *Biotropica* 46.1, 106-113. Online: <https://bit.ly/33INigu>.
- Fleischbein, K. y col. (2005). «Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties». En: *Hydrological Processes: An International Journal* 19.7, 1355-1371. Online: <https://bit.ly/3eMJGjL>.
- Gareca, E. y col. (2010). «*Polylepis* woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes». En: *Biodiversity and conservation* 19.12, 3327-3346. Online: <https://bit.ly/3osFHvW>.
- Germer, S., H. Elsenbeer y J. Moraes (2006). «Throughfall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, southwestern Amazonia (Rondônia, Brazil)». En: *Hydrology and Earth System Sciences* 10.3, 383-393. Online: <https://bit.ly/3oie8FJ>.
- Gerrits, A., L. Pfister y H. Savenije (2010). «Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest». En: *Hydrological Processes* 24.21, 3011-3025. Online: <https://bit.ly/2RYbo4g>.
- Gerrits, M. (2010). «The role of interception in the hydrological cycle». Doctoral thesis. Delft, Netherlands: Technische Universiteit Delft. Online: <https://bit.ly/3omnEr7>.
- Gomez, D. y col. (2008). «Rainfall and cloud-water interception in tropical montane forests in the eastern Andes of Central Peru». En: *Forest Ecology and Management* 255.3-4, 1315-1325. Online: <https://bit.ly/3tWXhJx>.
- Gosling, W. y col. (2009). «Long-term drivers of change in *Polylepis* woodland distribution in the central Andes». En: *Journal of Vegetation Science* 20.6, 1041-1052. Online: <https://bit.ly/3eXxCfQ>.
- Harden, C. y col. (2013). «Effects of land-use change on water in Andean páramo grassland soils». En: *Annals of the Association of American Geographers* 103.2, 375-384. Online: <https://bit.ly/2RuPGVp>.
- Hernández, M., D. Granados y A. Sánchez (2003). «Productividad de los ecosistemas en las regiones áridas». En: *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 9.2, 113-123. Online: <https://bit.ly/33O6XLO>.
- Herzog, S. y col. (2002). «Ecology and conservation of High-Andean *Polylepis* forests». En: *Ecotropica* 8, 93-95. Online: <https://bit.ly/3hB4WL0>.
- Hoch, G. y C. Körner (2005). «Growth, demography and carbon relations of *Polylepis* trees at the world's highest treeline». En: *Functional Ecology* 19.6, 941-951. Online: <https://bit.ly/3fjdzHD>.
- Holwerda, F., F. Scatena y L. Bruijnzeel (2006). «Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: A comparison of sampling strategies». En: *Journal of Hydrology* 327.3-4, 592-602. Online: <https://bit.ly/3ymj1lO>.
- Jadán, O. y col. (2019). «Regeneración de árboles en ecosistemas naturales y plantaciones de *Pinus patula* (Pinaceae) dentro de un gradiente altitudinal andino (Azuay, Ecuador)». En: *Revista de Biología Tropical* 67.1, 182-195. Online: <https://bit.ly/3f12psa>.
- Jennings, S., N. Brown y D. Sheil (1999). «Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures». En: *Forestry: An International Journal of Forest Research* 72.1, 59-74. Online: <https://bit.ly/2RwoANR>.
- Johnson, M. y J. Lehmann (2006). «Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow». En: *Ecoscience* 13.3, 324-333. Online: <https://bit.ly/3tUJzqG>.
- Keim, R., A. Skaugset y M. Weiler (2005). «Temporal persistence of spatial patterns in throughfall». En: *Journal of Hydrology* 314.1-4, 263-274. Online: <https://bit.ly/3wd4CGD>.
- Kessler, M. (2002). «The “*Polylepis* problem”: where do we stand». En: *Ecotropica* 8.2, 97-110. Online: <https://bit.ly/3ymoHw0>.
- Lemmon, P. (1956). «A spherical densiometer for estimating forest overstory density». En: *Forest science* 2.4, 314-320. Online: <https://bit.ly/3eNKKDW>.
- (1957). «Using Forest Densiometers». En: *Journal of Forestry* 55.9, 1-2. Online: <https://bit.ly/33LBfyP>.
- Levia, D. y E. Frost (2006). «Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems». En: *Progress in Physical Geography* 30.5, 605-632. Online: <https://bit.ly/2RV0MmL>.
- Levia, D. y S. Herwitz (2005). «Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils». En: *Catena* 64.1, 117-137. Online: <https://bit.ly/3eOMgFR>.
- Levia, D. y col. (2011). «Forest Hydrology and Biogeochemistry». En: Springer. Cap. Throughfall and Stemflow in Wooded Ecosystems, 425-443. Online: <https://bit.ly/3ynopVt>.

- Lieberman, M., D. Lieberman y R. Peralta (1989). «Forests are not just Swiss cheese: canopy stereogeometry of non-gaps in tropical forests». En: *Ecology* 70.3, 550-552. Online: <https://bit.ly/3w4TN9i>.
- Llorens, P. y F. Gallart (2000). «A simplified method for forest water storage capacity measurement». En: *Journal of hydrology* 240.1-2, 131-144. Online: <https://bit.ly/3uREiBH>.
- Loesch, H., J. Powers y S. Oberbauer (2002). «Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica». En: *Journal of Tropical Ecology*, 397-407. Online: <https://bit.ly/3bwU8d7>.
- Macinnis, C. y col. (2014). «Throughfall and stemflow vary seasonally in different land-use types in a lower montane tropical region of Panama». En: *Hydrological Processes* 28.4, 2174-2184. Online: <https://bit.ly/2Rne4bB>.
- Moličová, H. y P. Hubert (1994). «Canopy influence on rainfall fields' microscale structure in tropical forests». En: *Journal of Applied Meteorology* 33.12, 1464-1467. Online: <https://bit.ly/3ydzWXB>.
- Molina, A. y col. (2019). «Contributions of throughfall, forest and soil characteristics to near-surface soil water-content variability at the plot scale in a mountainous Mediterranean area». En: *Science of the Total Environment* 647, 1421-1432. Online: <https://bit.ly/3fqMMZX>.
- Montalvo, J. y col. (2018). «Características morfológico-funcionales, diversidad arbórea, tasa de crecimiento y de secuestro de carbono en especies y ecosistemas de *Polylepis* del sur de Ecuador». En: *Ecología Austral* 28.1-bis, 249-261. Online: <https://bit.ly/33KSQXI>.
- Morales, L. y col. (2018). «Differential seedling regeneration patterns across forest-grassland ecotones in two tropical treeline species (*Polylepis* spp.)». En: *Austral Ecology* 43.5, 514-526. Online: <https://bit.ly/3ykOMLS>.
- Moser, G., D. Hertel y C. Leuschner (2007). «Altitudinal change in LAI and stand leaf biomass in tropical montane forests: a transect study in Ecuador and a pan-tropical meta-analysis». En: *Ecosystems* 10.6, 924-935. Online: <https://bit.ly/33NC6z3>.
- Murakami, S. (2006). «A proposal for a new forest canopy interception mechanism: Splash droplet evaporation». En: *Journal of Hydrology* 319.1-4, 72-82. Online: <https://bit.ly/3yfx6Bn>.
- Nadkarni, N. y M. Sumera (2004). «Old-growth forest canopy structure and its relationship to throughfall interception». En: *Forest Science* 50.3, 290-298. Online: <https://bit.ly/3tTMr0>.
- Nisbet, T. (2005). «Water Use by Trees». En: *Forestry Commission* 65, 1-8. Online: <https://bit.ly/33Lk14T>.
- Norman, J. y G. Campbell (1989). «Plant physiological ecology». En: Springer. Cap. Canopy structure, 301-325. Online: <https://bit.ly/2SLIwfO>.
- Ochoa, A., P. Crespo y R. Céleri (2018). «Quantification of rainfall interception in the high Andean tussock grasslands». En: *Ecohydrology* 11.3, e1946. Online: <https://bit.ly/33KbQpo>.
- Ochoa, A. y col. (2019). «Actual evapotranspiration in the high Andean grasslands: A comparison of measurement and estimation methods». En: *Frontiers in Earth Science* 7, 1-16. Online: <https://bit.ly/3ols2GS>.
- Oyarzún, C. y col. (2011). «Seasonal and annual throughfall and stemflow in Andean temperate rainforests». En: *Hydrological Processes* 25.4, 623-633. Online: <https://bit.ly/3hCi7vc>.
- Padrón, R. y col. (2015). «Rainfall in the Andean Páramo: new insights from high-resolution monitoring in Southern Ecuador». En: *Journal of Hydrometeorology* 16.3, 985-996. Online: <https://bit.ly/3yffYHa>.
- Park, A. y J. Cameron (2008). «The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation». En: *Forest Ecology and Management* 255.5-6, 1915-1925. Online: <https://s.si.edu/2RYcVqS>.
- Pinos, J. (2014). «Biomasa foliar, desfronde y descomposición de la hojarasca en los rodales de *Polylepis reticulata* del Parque Nacional Cajas». Tesis de grado. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Online: <https://bit.ly/3uRJg1d>.
- Pinos, J. y col. (2017). «Leaf Litterfall and Decomposition of *Polylepis reticulata* in the Treeline of the Ecuadorian Andes». En: *Mountain Research and Development* 37.1, 87-96. Online: <https://bit.ly/3hARMxX>.
- Pukkala, T. y col. (1991). «Predicting spatial distribution of direct radiation below forest canopies». En: *Agricultural and Forest Meteorology* 55.3-4, 295-307. Online: <https://bit.ly/33LmEnh>.
- Quiroz, C. y col. (2019). «Comparison of Natural Regeneration in Natural Grassland and Pine Plantations across an Elevational Gradient in

- the Páramo Ecosystem of Southern Ecuador». En: *Forests* 10.9, 1-30. Online: <https://bit.ly/2SVwUHL>.
- Ramos Franco, A. y D. Armenteras (2019). «Intercepción y escorrentía del bosque altoandino en la reserva forestal protectora “El Malmo”». En: *Acta Biológica Colombiana* 24.1, 97-108. Online: <https://bit.ly/3hruCKc>.
- Rangel, O. y H. Arellano (2010). «Colombia Diversidad Biótica X. Cambio Global (Natural) y Climático (Antrópico) en el páramo colombiano. Bogotá». En: Instituto de Ciencias Naturales-Facultad de Ciencias-Universidad Nacional de Colombia. Cap. Bosques De *Polylepis*: Un Tipo de vegetación condenado a la extinción, 443-478. Online: <https://bit.ly/3yoWpki>.
- Renison, D., I. Hensen y R. Suarez (2011). «Landscape structural complexity of high-mountain *Polylepis australis* forests: a new aspect of restoration goals». En: *Restoration Ecology* 19.3, 390-398. Online: <https://bit.ly/2RlsUze>.
- Renison, D. y col. (2006). «Cover and growth habit of *Polylepis* woodlands and shrublands in the mountains of central Argentina: human or environmental influence?» En: *Journal of Biogeography* 33.5, 876-887. Online: <https://bit.ly/3ojlM6>.
- Roth, B., K. Slatton y M. Cohen (2007). «On the potential for high-resolution lidar to improve rainfall interception estimates in forest ecosystems». En: *Frontiers in Ecology and the Environment* 5.8, 421-428. Online: <https://bit.ly/2QsQda8>.
- Staelens, J. y col. (2006). «Spatial variability and temporal stability of throughfall deposition under beech (*Fagus sylvatica* L.) in relationship to canopy structure». En: *Environmental Pollution* 142.2, 254-263. Online: <https://bit.ly/33LDl1R>.
- Teale, N. y col. (2014). «Impacts of vegetation and precipitation on throughfall heterogeneity in a tropical pre-montane transitional cloud forest». En: *Biotropica* 46.6, 667-676. Online: <https://bit.ly/3hzDIKj>.
- Tinoco, B. y col. (2013). «Influence of patch factors and connectivity on the avifauna of fragmented *Polylepis* forest in the Ecuadorian Andes». En: *Biotropica* 45.5, 602-611. Online: <https://bit.ly/2RmA4mY>.
- Tsiko, C. y col. (2012). «Measuring forest floor and canopy interception in a savannah ecosystem». En: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 47, 122-127. Online: <https://bit.ly/2RmAgTe>.
- Valencia, B. y col. (2018). «*Polylepis* woodland dynamics during the last 20,000 years». En: *Journal of Biogeography* 45.5, 1019-1030. Online: <https://bit.ly/33UhWn1>.
- Weiqing, Z. y col. (2007). «Spatial variability of throughfall in a Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) plantation in northern China». En: *Frontiers of Forestry in China* 2.2, 169-173. Online: <https://bit.ly/3uUfo4b>.
- Wullaert, H. y col. (2009). «Spatial throughfall heterogeneity in a montane rain forest in Ecuador: extent, temporal stability and drivers». En: *Journal of Hydrology* 377.1-2, 71-79. Online: <https://bit.ly/3eRSBk1>.
- Zhang, G. y col. (2006). «Modelling and measurement of two-layer-canopy interception losses in a subtropical evergreen forest of central-south China». En: *Hydrology and Earth System Sciences* 10.1, 65-77. Online: <https://bit.ly/3eOg71c>.
- Zimmermann, A., W. Wilcke y H. Elsenbeer (2007). «Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador». En: *Journal of Hydrology* 343.1-2, 80-96. Online: <https://bit.ly/3tS49rM>.
- Zimmermann, A., B. Zimmermann y H. Elsenbeer (2009). «Rainfall redistribution in a tropical forest: Spatial and temporal patterns». En: *Water Resources Research* 45.11, 1-18. Online: <https://bit.ly/3huuc5H>.
- Zimmermann, A. y col. (2008). «Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest». En: *Journal of Hydrology* 360.1-4, 87-102. Online: <https://bit.ly/3hwkrnt>.



INFLUENCIA DE INTERVENCIONES EDUCATIVAS SOBRE NUTRICIÓN Y SOSTENIBILIDAD EN UNIVERSITARIOS ECUATORIANOS RESIDENTES EN HONDURAS

INFLUENCE OF EDUCATIONAL INTERVENTIONS ON NUTRITION AND SUSTAINABILITY IN ECUADORIAN UNIVERSITY STUDENTS RESIDING IN HONDURAS

Jean Pierre Enriquez¹ y Adriana Hernández-Santana²

¹Programa de Maestría en Agricultura Tropical Sostenible, Departamento de Posgrado. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras, C.A.

²Laboratorio de Nutrición Humana, Departamento de Agroindustria Alimentaria. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras, C.A.

*Autor para correspondencia: jean.enriquez.2018@alumni.zamorano.edu

Manuscrito recibido el 19 de octubre de 2020. Aceptado, tras revisión, el 24 de febrero de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

Los hábitos alimenticios pueden verse comprometidos en la transición a la vida universitaria especialmente en un nuevo país. Además, los patrones alimenticios de los jóvenes universitarios podrían mejorarse mediante diversas estrategias durante el proceso de adaptación a la universidad. Por lo cual, un punto clave lo constituyen la nutrición y la sostenibilidad, cuyo contenido puede ser impartido mediante sesiones educativas en las universidades. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de intervenciones educativas en la adherencia a la dieta mediterránea (DM) y hábitos alimenticios en estudiantes ecuatorianos de primer año universitario en Honduras, donde la población estudiantil de Ecuador se posiciona en segundo lugar, luego de Honduras. Los patrones alimenticios se evaluaron mediante un cuestionario de adherencia a la DM y uno de conductas alimenticias. Las intervenciones educativas se centraron en los beneficios sobre la sostenibilidad, cultura, ambiente y salud que brinda la DM. El estudio tuvo una fase diagnóstica con la participación del universo de estudiantes ($n = 65$), y una fase de intervenciones donde participaron 32 estudiantes: 18 en el grupo que recibió educación nutricional y 14 en el grupo control. El grupo que recibió intervención educativa mejoró sus conductas alimenticias pasando de poco saludables a moderadamente saludables, sin embargo, la adherencia a la DM no presentó incrementos al final de las intervenciones ($p > 0,05$). El grupo control no presentó cambios en ninguna evaluación, manteniéndose en conductas poco saludables y una baja adherencia a la DM. Cincuenta por ciento de los estudiantes del grupo con intervención regresaron a Ecuador durante la crisis de COVID-19, mientras que en el grupo control fue el 71,4%. En conclusión, es importante brindar asesoramiento sobre nutrición y sostenibilidad desde el inicio de los estudios universitarios, ya que los jóvenes migran hacia un país con costumbres totalmente distintas a las de Ecuador e incluso de la Comunidad Andina.

Palabras clave: Dietas sostenibles, educación nutricional, estudiantes ecuatorianos, hábitos alimenticios.

Abstract

Eating habits can be compromised in the transition to college life specially in a new country. In addition, the eating patterns of college students could be improved through various strategies during the college adjustment process. A key point is nutrition and sustainability, whose content can be taught through educational sessions at universities. The objective of this study was to evaluate the effect of educational interventions and adherence to the Mediterranean diet (MD) in Ecuadorian first-year university students in Honduras, where the student population of Ecuador ranks second, after Honduras. Eating patterns were evaluated using a questionnaire on adherence to MD and one on eating behaviors. The educational interventions focused on the benefits of sustainability, culture, environment, and health that MD provides. The study had a diagnostic phase with the participation of the universe of students ($n = 65$), and an intervention phase where 32 students participated: 18 in the group that received nutritional education and 14 in the control group. The group that received educational intervention improved their eating behaviors, going from unhealthy to moderately healthy, however, adherence to MD did not show increases at the end of the interventions ($p > 0.05$). The control group did not present changes in any attribute, remaining in unhealthy behaviors and low adherence to MD. Fifty percent of the students in the intervention group returned to Ecuador during the COVID-19 crisis, while in the control group it was 71.4%. In conclusion, it is important to provide advice on nutrition and sustainability from the beginning of university studies, since young people migrate to a country with totally different customs from those of Ecuador and even the Andean Community.

Keywords: Eating habits, Ecuadorian students, nutritional education, sustainable diets.

Forma sugerida de citar: Enriquez, J.P. y Hernández-Santana, A. (2021). Influencia de intervenciones educativas sobre nutrición y sostenibilidad en universitarios Ecuatorianos residentes en Honduras). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 34(2):80-90. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.05>.

IDs Orcid:

Jean Pierre Enriquez: <http://orcid.org/0000-0001-6174-6429>

Adriana Hernández-Santana: <http://orcid.org/0000-0002-7802-3611>

1 Introducción

Los cambios en las prácticas agrícolas han incrementado la capacidad mundial de abastecimiento de alimentos de una manera más productiva, brindando mayor diversidad de alimentos y una menor dependencia estacional (Kearney, 2010). Por lo cual, es importante velar por asegurar la estabilidad alimentaria mediante el acceso, utilización y condiciones económicas en los alimentos, lo que guarda una estrecha relación con los principios de la seguridad alimentaria (Anderson, 2019). Además, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las enfermedades no transmisibles (ENT) son la principal causa de muerte en el mundo (WHO, 2014). Por otro lado, un dato alentador indica que en la última década la probabilidad de muerte prematura por ENT se ha reducido 15% a nivel mundial, siendo los países de altos ingresos quienes exhiben los mayores progresos gracias a la reducción de la mortalidad (WHO, 2015).

Existen patrones de consumo alternativos como los alimentos orgánicos que buscan mejorar la salud y hábitos alimenticios de las personas. Es así como estos alimentos son considerados más saludables, sabrosos y auténticos que la comida tradicional, sin embargo, se catalogan también como más costosos (Bryła, 2016). En este sentido, el precio es una de las principales barreras para las dietas saludables. Por ejemplo, en Galápagos-Ecuador, sus residentes han aumentado el consumo de alimentos procesados y ultra procesados debido a su fácil acceso, disminuyendo así el consumo de productos frescos (Freire y col., 2018).

Así, las dietas sostenibles buscan suplir los requerimientos energéticos mediante alimentos inocuos de alta calidad nutricional, siendo alcanzables, accesibles y culturalmente adecuadas (Dernini y col., 2016). Además, de poseer un impacto ambiental reducido, contribuyen a la seguridad alimentaria y nutricional (SAN) y orientan a la población hacia una vida sana (FAO, 2012; Donini y col., 2016). Entre las dietas sostenibles, figura la dieta mediterránea (DM), siendo presentada como modelo cultural y ecológico de prevención y reducción del riesgo de ENT como enfermedades autoinmunes, cardiovasculares, síndrome metabólico, cáncer y neurodegenerativas (Dussaillant y col., 2016; Caddarso y col., 2017; Gómez, 2018), que pueden traer

severas consecuencias en la edad adulta, pero un adecuado estilo de vida especialmente desde los años universitarios o incluso antes pueden ayudar a prevenirlas.

La mayoría de los campus universitarios tienen comedores que ofrecen una variedad de opciones de alimentos, generando comportamientos alimentarios positivos y también no tan adecuados (Abraham, Noriega y Shin, 2018). La transición a la universidad provoca cambios significativos en las opciones dietéticas, generándose incluso desafíos dietéticos. Incluso, las costumbres del colegio pueden ser una determinante para los hábitos alimenticios en la universidad. Sánchez y col. (2018), en un colegio ecuatoriano encontraron que el 90% de sus estudiantes consumen comida chatarra y snacks durante su receso, apuntando al riesgo de manifestaciones tempranas de enfermedades metabólicas, de alto costo social y económico para la familia y el estado.

Los estudiantes pueden tener un conocimiento competente sobre los requisitos nutricionales. Sin embargo, la transición a la vida universitaria les da más libertad para elegir el tipo y la cantidad de alimentos que comen. Este patrón se genera debido a la inevitable situación de que los estudiantes universitarios se enfrenten a un nuevo entorno para la preparación y planificación de las comidas durante la transición a su vida universitaria (Abraham, Noriega y Shin, 2018). El realizar intervenciones educativas permite que un consumidor se relacione con el concepto de consumo responsable, que implica cierta conciencia y elecciones activas. En Quito, los ciudadanos pueden incidir en su entorno alimentario a través de campañas y organizaciones que promuevan la creación de mercados barriales, abiertos y agroecológicos (Paredes y col., 2019). Sin embargo, una sola medida promocional no es suficiente para desalentar el consumo de alimentos poco saludables.

Actualmente no se han desarrollado estudios sobre los comportamientos alimenticios para universitarios ecuatorianos en Honduras por tal motivo el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de intervenciones educativas y la adherencia a una dieta saludable y sostenible (dieta mediterránea) en estudiantes ecuatorianos de primer año universitario en Honduras.

2 Materiales y Métodos

2.1 Diseño del estudio

Se realizó un estudio analítico de cohorte descriptivo longitudinal entre febrero y junio del 2020 en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, localizada en Honduras que cuenta con una población estudiantil de alrededor de 29 países principalmente del continente americano, los cuales viven en un internado de enero a diciembre por cuatro años. Los datos presentados en este estudio se derivan de encuestas de conductas alimenticias y adherencia a la DM antes y después de intervenciones educativas nutricionales en la pandemia de COVID-19.

2.2 Participantes

Se convocaron 65 estudiantes ecuatorianos para recibir una charla magistral de educación nutricional durante el primer periodo del año académico 2020, antes de que iniciara la pandemia de COVID-19 en América Latina. En la reunión se aprovechó a reclutar de manera voluntaria a dichos estudiantes, previo a socializar el estudio indicando el objetivo, temática y beneficios para el participante e investigador. La participación fue voluntaria, mediante la firma del consentimiento informado. Para este análisis se consideraron únicamente estudiantes ecuatorianos de primer año, debido a que el estudio contó con la primera toma de datos en el segundo mes de clases. Además, se excluyeron a los estudiantes de segundo, tercero y cuarto año, quienes ya tuvieron su etapa crítica de transición al sistema universitario y al ambiente cultural del nuevo país.

2.3 Fase diagnóstica

Para contextualizar la situación de los 65 estudiantes ecuatorianos, se realizó la toma de datos de conductas alimenticias y adherencia a la DM. Cuarenta y dos participantes fueron del sexo masculino y 23 del femenino.

2.4 Fase intervenciones

Al iniciar el periodo lectivo en el primer año, la universidad aleatoriza equitativamente a los estudiantes por nacionalidad y género en ocho subgrupos. Con este antecedente se procedió a asignar aleatoriamente cuatro de dichos subgrupos para conformar el grupo control y los cuatro restantes al grupo

que recibiría intervenciones. Se obtuvo una muestra final de 32 participantes. Se contó con un grupo ($n = 18$) al cual se le brindó intervenciones de educación nutricional, de los cuales 7 estudiantes fueron del género masculino y 11 del femenino. Se realizaron ocho sesiones de aproximadamente una hora, cuatro de ellas de manera presencial y cuatro de manera virtual debido a la emergencia del COVID-19. La temática se centró en las bondades de la DM en los ámbitos de nutrición, salud, sostenibilidad, biodiversidad e impacto ambiental. Las plataformas electrónicas utilizadas para compartir contenido entre el investigador y los participantes fueron redes sociales (Facebook, WhatsApp y Microsoft Teams). El uso de redes sociales incluyó información educativa, mensajes, recordatorios, encuestas e información de eventos relacionados con la DM. Se enfatizó en la adecuada elección de alimentos por los consumidores y sus beneficios a futuro. Por su parte, el grupo control ($n = 14$) no recibió educación nutricional, aquí 6 participantes pertenecieron al género masculino y 8 al femenino.

2.5 Instrumentos

Para las conductas alimenticias se utilizó un cuestionario de 31 preguntas de opción múltiple diseñado y validado por Márquez y col. (2014), omitiendo dos preguntas que representan los horarios y personas con quien ingiere los alimentos, entre semana y el fin de semana, debido a que no aplican en el ambiente estudiantil de Zamorano, ya que es un internado con un horario establecido de comidas y el círculo social de los estudiantes son sus propios compañeros, teniendo un número final de 29 preguntas. La temática de las preguntas se centró en los hábitos, comportamientos y gustos alimenticios en escenarios personales, familiares, culturales e institucionales. Las puntuaciones obtenidas de los hábitos alimenticios se agrupan en cuatro categorías: saludables (23-30 puntos), moderadamente saludables (16-22 puntos), poco saludables (8-15 puntos) y muy poco saludables (<8 puntos). También se tomó en consideración la autopercepción de mejora en conductas alimenticias en la pandemia COVID-19.

Para la adherencia a la DM, se aplicó el cuestionario de 14 puntos, utilizado en el estudio PREDIMED (Prevención con Dieta Mediterránea), estudio de intervención nutricional realizado y validado en España, utilizado para evaluar a largo plazo la efi-

cacia de la DM en la prevención primaria de enfermedades cardiovasculares (Martínez y col., 2015). Dicho cuestionario está compuesto de 14 preguntas directas sobre el consumo de los principales alimentos de la DM: aceite de oliva, frutas, verduras y hortalizas, legumbres, pescado, frutos secos, consumo moderado de vino y de carnes blancas, y escaso consumo de carnes rojas y procesadas. Las puntuaciones obtenidas se agrupan en cuatro categorías de adhesión: alta (12-14 puntos), media (8-11 puntos), baja (5-7 puntos) y muy baja (<5 puntos).

2.6 Estadística

Para la fase diagnóstica, los resultados se resumieron utilizando estadísticas descriptivas con medias, porcentajes y desviación estándar. Por su parte, para la fase de intervenciones, se realizó una prueba de comparación de muestras independientes (grupo control y grupo al que se aplicaron intervenciones educativas), con el objetivo de identificar el efecto de las intervenciones educativas en las conductas y adherencia a la DM. Se realizó también un análisis de muestras pareadas mediante la prueba t-student

(antes y después en cada grupo) para identificar diferencias entre los efectos de las conductas y adherencia a la DM. Además, se realizó una prueba de McNemar para evaluar la significancia de las distribuciones de adherencia y conductas alimenticias en los dos periodos. Todos los análisis tuvieron un nivel de confianza del 95 %, y se utilizaron los programas JAMOV y Statistical Analysis Software SAS® versión 9.4.

3 Resultados

3.1 Fase diagnóstica

Para las conductas alimenticias, la media general fue de 14,28 que muestra conductas alimenticias poco saludables. La mayoría (68 %) se ubicaron en conductas poco saludables y muy poco saludables. Además, ninguno de los participantes presentó conductas saludables. En el caso de la adherencia a la DM, se obtuvo una media general de 8,05 indicando una adherencia media. La mayoría de los participantes (94 %) se ubicaron en adherencia media y baja (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de las conductas alimenticias y adherencia a la DM a través de sus respectivos niveles.

Conductas alimenticias	n	%	Adherencia a la DM	n	%
Saludable	0	0	Alta adherencia	2	3
Moderadamente saludable	21	32	Adherencia media	40	62
Poco saludable	43	66	Baja adherencia	21	32
Muy poco saludable	1	2	Muy baja adherencia	2	3

3.2 Fase intervenciones

En el grupo que recibió intervenciones educativas para las conductas alimenticias de la primera toma de datos se observó que un 72 % mostraba conductas poco saludables. Sin embargo, para la segunda toma de datos, el 50 % de los participantes se ubicaron en conductas moderadamente saludables y saludables. En cuanto a la adherencia a la DM, en la primera toma de datos, el 61 % se situaba en adherencia media, manteniéndose en la misma clasificación con un 44 % de los participantes para la segunda toma de datos (Tabla 2). En este grupo, el 50 % de los estudiantes se encontraban en el campus durante la pandemia y el 50 % en Ecuador.

En cuanto al grupo control, para la primera toma de datos, el 64 % de los participantes se situó en conductas poco saludables, manteniéndose en la misma clasificación en la segunda toma de datos con 43 % de los participantes. En la adherencia a la DM, en la primera toma de datos el 64 % de las observaciones pertenecían a adherencia media y el 36 % a baja adherencia. Para la segunda toma la adherencia media se reflejó en el 50 % de los participantes (Tabla 2). En este grupo, el 28,6 % de los estudiantes se encontraban en el campus durante la pandemia y el 71,4 % en Ecuador.

Según la prueba de McNemar, los cambios en las distribuciones de las conductas alimenticias en los dos periodos resultaron significativos en el grupo

que recibió intervenciones educativas, en conductas poco saludables ($p=0,046$). Para la adherencia a la DM, únicamente resultó significativo en el grupo control, en adherencia media ($p=0,025$).

Tabla 2. Distribución del grupo con intervenciones y el control en las dos tomas de datos, con prueba McNemar.

	Grupo intervención					Grupo control				
	Antes		Después		<i>p</i>	Antes		Después		<i>p</i>
	n	%	n	%		n	%	n	%	
Conductas alimenticias										
Saludable	0	0	1	6	-	0	0	1	7	-
Moderadamente saludable	5	28	8	44	0,083	5	36	6	43	0,317
Poco saludable	13	72	9	50	0,046	9	64	6	43	0,083
Muy poco saludable	0	0	0	0	-	0	0	1	7	-
Adherencia a la DM										
Alta adherencia	1	6	0	0	-	0	0	1	7	-
Adherencia media	11	61	8	44	0,083	9	64	4	29	0,025
Baja adherencia	6	33	8	44	0,157	5	36	7	50	0,157
Muy baja adherencia	0	0	2	11	-	0	0	2	14	-

Aquellos espacios que no poseen un valor numérico para la probabilidad se debe a que en uno de los dos periodos se tiene cero observaciones.

De la Tabla 3 se destaca que el grupo que recibió intervenciones educativas, la media de las conductas alimenticias incrementó de 13,89 (poco saludable) a 16 (moderadamente saludable). Para el grupo control, en la primera toma de datos se reportó una media general de 14,79 en conductas alimenticias, situándose en conductas poco saludables. Sin embargo, en la segunda toma de datos, la media de las conductas alimenticias fue de 14,71.

De acuerdo a la prueba t de muestras pareadas únicamente existió significancia para el grupo con intervenciones educativas en las conductas alimenticias, donde existió diferencia entre las conductas alimenticias posterior a dichas intervenciones ($p<0,001$). Para el análisis de muestras independientes, las conductas y la adherencia a la DM no fueron significativamente diferentes en ningún período ($p>$

0,05). En cuanto a la Tabla 4, se destaca lo siguiente: en el grupo con intervenciones, inicialmente, la media general de la adherencia se situó en 8,5; posteriormente se situó en 7,06 para la segunda toma de datos. Para el grupo control, la media inicial fue de 7,93 situándose en baja adherencia, ya en la segunda toma la media se situó en 7 con baja adherencia.

De acuerdo a la prueba t de muestras pareadas únicamente existió significancia para el grupo con intervenciones educativas, donde existió diferencia entre la adherencia inicial con la posterior ($p=0,010$). Para el análisis de muestras independientes, las conductas y la adherencia a la DM no fueron significativamente diferentes en ningún período ($p>0,05$).

Tabla 3. Conductas alimenticias de los dos grupos en los dos periodos de tiempo con muestras pareadas e independientes.

	Intervención		Control		<i>p</i> Muestras independientes
	Media	D.E.	Media	D.E.	
Conductas alimenticias antes	13,89	3,14	14,79	3,45	0,449
Conductas alimenticias después	16,00	3,34	14,71	5,34	0,410
	Student's t	<i>p</i>	Student's t	<i>p</i>	
Muestras pareadas	-4,421	< 0,001	0,053	0,959	

Tabla 4. Adherencia a la Dieta Mediterránea (DM) de los dos grupos en los dos periodos de tiempo, con muestras pareadas e independientes.

	Intervención		Control		<i>p</i> Muestras independientes
	Media	D.E.	Media	D.E.	
Adherencia a la DM antes	8,50	1,76	7,93	2,09	0,407
Adherencia a la DM después	7,06	1,80	7,00	2,60	0,943
	Student's t	<i>p</i>	Student's t	<i>p</i>	
Muestras pareadas	2,89	0,010	1,447	0,172	

4 Discusión

Las conductas alimenticias poco saludables del grupo total de estudiantes ecuatorianos ($n = 65$), son un indicador preocupante ya que esto podría desencadenar problemas de sobrepeso, obesidad o incluso enfermedades crónicas. En este sentido, Racette y col. (2005), mencionan que los mayores incrementos en el sobrepeso y la obesidad ocurren en personas entre 18 y 29 años, rango de edad de un estudiante universitario. Además, la mayoría de los universitarios al dejar el hogar de sus padres se adaptan a cambios sociales, ambientales, y experimentan nuevas responsabilidades financieras (Das y Evans, 2014). Lo cual empeoraría las conductas poco saludables ya manifestadas.

Los estudiantes universitarios pueden representar un grupo con alto riesgo de desarrollar conductas alimentarias anormales y ejercicio compulsivo (Guidi y col., 2009). Además, se encuentran destacando como barreras comunes de una alimentación

saludable, las limitaciones de tiempo, refrigerios poco saludables, alimentos prácticos ricos en calorías, estrés, altos precios de los alimentos saludables y el fácil acceso a la comida chatarra (Sogari y col., 2018). En general los universitarios se ven afectados por barreras relacionadas con la disponibilidad de tiempo, barreras ambientales como la falta de opciones de comidas baratas, sabrosas y saludables en el comedor de la universidad (Hilger y Diehl, 2019). Es aquí cuando una intervención oportuna de educación nutricional puede ser un punto clave para mejorar los estilos de vida de los jóvenes universitarios.

Se ha identificado que las intervenciones educativas lograron mejorar los hábitos alimenticios pasando de poco saludables a moderadamente saludables ($p < 0,001$) en el grupo que completó el curso capacitación. Esto concuerda con lo encontrado por Hekler, Gardner y Robinson (2010), donde aquellos estudiantes que llevaron un curso de Alimentos y Sociedad incrementaron su alimentación saluda-

ble, obteniendo mejoras en el consumo de vegetales disminuyendo también la ingesta de lácteos ricos en grasas. Además, Boyle y LaRose (2009), descubrieron que los factores intra e interpersonales, así como ambientales, afectan la actividad física y los hábitos alimenticios de los estudiantes universitarios. Boucher, Gagné y Côté (2015), encontraron que las intervenciones educativas incrementaron el consumo de frutas y verduras en estudiantes, haciendo hincapié en la importancia de desarrollar intervenciones adaptadas a los estudiantes universitarios para promover comportamientos saludables. Por otro lado, quienes perciben que la intoxicación alimentaria es una amenaza personal tienden a comer menos alimentos peligrosos (Byrd y col., 2008).

El cambio de 22% (del 72 al 50%) de estudiantes con conductas alimenticias poco saludables ($p = 0,046$) muestra la reciprocidad de los participantes por poner en práctica la información obtenida, contrario al grupo control en donde a pesar de la disminución del 64 a 43% no existió diferencia significativa ($p = 0,083$). Esto concuerda con lo encontrado por Reed y col. (2011), en el que 10 al 19% de los universitarios participantes del estudio modificaron sus elecciones alimenticias posterior a recibir la información de la intervención.

Una encuesta sobre la efectividad de una aplicación para teléfonos inteligentes en promoción de la salud para estudiantes universitarios mostró que muchos estudiantes no tenían buena salud y no presentaban comportamientos saludables, pese a declarar que la aplicación era útil, beneficiosa y aumentaba la autoconciencia (Miller, Chandler y Mouttapa, 2015). Lo cual concuerda con nuestro estudio en donde a pesar de completar el curso de educación nutricional con una buena participación, no todos los estudiantes mejoraron sus hábitos alimenticios. Una posibilidad a esto es que, frente a la pandemia, el estrés relacionado con el encierro haya provocado alteraciones respecto a los atracones y restricciones dietéticas (Flaudias y col., 2020).

El 50 y 71,4% de los estudiantes del grupo con intervenciones y control, respectivamente, regresaron a Ecuador por la pandemia, lo que podría ser una de las causas que se obtengan resultados positivos en la mejora de hábitos alimenticios, ya que contaban con el apoyo familiar para aplicar en conjunto los conocimientos adquiridos. Esto concorda-

ría con lo encontrado en un estudio etnográfico que examinó las trayectorias universitarias de los estudiantes rurales de primera generación, en donde debido a la importancia de las políticas y prácticas familiares, institucionales, estatales y federales, se debe involucrar a las familias y replicar los modelos de apoyo familiar (Beasley, 2016).

Los intentos de cambiar las dietas de la población a menudo adoptan enfoques muy individualistas, que pueden pasar por alto factores estructurales que influyen en el acceso y la disponibilidad de opciones de alimentos saludables (VanHeuvelen y VanHeuvelen, 2019). La mayoría de las personas están de acuerdo en que los hábitos alimenticios de la población no son saludables, sin embargo, perciben que comen de manera más saludable que otras personas de su entorno (Sproesser y col., 2015). Por lo tanto, se necesitan esfuerzos en los campus universitarios para promover estilos de vida saludables entre su población estudiantil durante los años universitarios (Gropper y col., 2012).

Al evaluar la adherencia a la DM del grupo completo de estudiantes ecuatorianos en fase diagnóstica, se obtuvo en promedio 8,05 puntos, posicionando al grupo en adherencia media. Sin embargo, una vez concluidas las intervenciones con los 18 participantes de este grupo se tuvo una disminución significativa ($p = 0,01$), en esta adherencia, disminuyendo a baja adherencia, denotando niveles mayores al 50% en los dos grupos con baja y muy baja adherencia. Esto concuerda con Míguez y col. (2013), quien encontró que el 90% de los estudiantes universitarios necesita modificar sus hábitos alimenticios para adecuarse a este patrón dietético. Además, un estudio realizado en una población universitaria española también concuerda con nuestro estudio, donde el 96,1% de los sujetos necesita mejorar la calidad de su dieta y únicamente el 5,3% de los estudiantes consiguieron una alta adherencia a la dieta mediterránea (García y col., 2014).

Un estudio sobre conocimiento nutricional en Italia muestra que este se asoció significativamente con una mayor adherencia a la DM independientemente de los factores socioeconómicos (Bonaccio y col., 2013). Lo anterior contrasta con esta investigación, en donde los factores socioeconómicos, especialmente por el COVID-19, pudieron haber limitado la disponibilidad de ciertos alimentos en los

estudiantes que se encontraban en Ecuador. Navarro y col. (2014), encontraron que los estudiantes que vivían en la casa de sus padres tuvieron un alto porcentaje de adherencia, el cual fue significativamente mayor al de quienes vivían en apartamentos o residencias estudiantiles. Además, la pandemia amenaza a millones de personas que viven o corren riesgo de desarrollar inseguridad alimentaria (Paslakis, Dimitropoulos y Katzman, 2020), situación que pudo presentarse en ambos grupos debido al acceso limitado a ciertos alimentos en todos los países.

Un estudio que buscaba determinar la adherencia a la dieta mediterránea de una población universitaria y analizar varios factores que pueden condicionar su calidad nutricional encontró que el 9,5% de los universitarios tenía un índice de adherencia bajo, el 62,1% intermedio y el 28,4% alto (Durrá y Castroviejo, 2011), que concuerda con nuestras distribuciones de la primera toma de datos. Por lo tanto, resulta necesario asegurar que la seguridad alimentaria, las actitudes y comportamientos alimentarios saludables sean una prioridad global para poder garantizar la salud de la población, especialmente frente a la pandemia (Paslakis, Dimitropoulos y Katzman, 2020).

5 Conclusiones

Este estudio indica una mayor tendencia en la mejora de las conductas alimenticias al realizarse intervenciones educativas en universitarios. Por lo tanto, por medio de estos programas se pueden disminuir los malos hábitos alimenticios que se generan en la transición del hogar hacia la vida universitaria en un nuevo país. Sin embargo, la adherencia a un patrón dietético saludable y sostenible tuvo una disminución que pudo haberse visto comprometido por los problemas de accesibilidad a ciertos alimentos como consecuencia de la pandemia.

Es necesario generar políticas y programas de apoyo a los estudiantes para fortalecer sus conocimientos sobre nutrición y sostenibilidad. Estas nociones deben ser capaces de generar un factor de impacto en los estudiantes que les permita mejorar sus hábitos alimenticios y adoptar patrones dietéticos que benefician la salud humana y ambiental. Además, es importante dar este asesoramiento desde el

inicio de los estudios universitarios, ya que los jóvenes migran hacia países con costumbres totalmente distintas a su país natal, e incluso de la Comunidad Andina. La mejora en los hábitos alimenticios en tiempos de pandemia en los estudiantes ecuatorianos refleja que es necesario desarrollar programas institucionales que faciliten su proceso de transición a la universidad.

Agradecimientos

Al programa de Maestría en Agricultura Tropical Sostenible (MATS) de Zamorano y al Instituto de Tecnología en Cuidado de la Salud (ITHC) por el apoyo con los materiales de la investigación. De manera muy especial agradecemos a todos los participantes del estudio.

Referencias

- Abraham, S., B. Noriega y J. Shin (2018). «College students eating habits and knowledge of nutritional requirements». En: *Journal of Nutrition and Human Health* 2.1, 13-17. Online: <https://bit.ly/2RgCFOO>.
- Anderson, J. (2019). «Concepts of Stability in Food Security». En: *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*. Elsevier, 8-15. Online: <https://bit.ly/3xkh4FX>.
- Beasley, E. (2016). «Country Roads Take Me ... ? : A Cultural Analysis of College Pathways among Rural, First-Generation Students». En: *Paradoxes of the Democratization of Higher Education (Research in Social Problems and Public Policy)*. Vol. 22. Emerald Group Publishing Limited, 127-163. Online: <https://bit.ly/3aTGyQY>.
- Bonaccio, M. y col. (2013). «Nutrition knowledge is associated with higher adherence to Mediterranean diet and lower prevalence of obesity. Results from the Moli-sani study». En: *Appetite* 68, 139-146. Online: <https://bit.ly/3uPmJ4H>.
- Boucher, D., C. Gagné y F. Côté (2015). «Effect of an intervention mapping approach to promote the consumption of fruits and vegetables among young adults in junior college: A quasi-experimental study». En: *Psychology & Health* 30.11, 1306-1325. Online: <https://bit.ly/32m7jZj>.

- Boyle, J. y N. LaRose (2009). «Personal beliefs, the environment and college students' exercise and eating behaviors». En: *American Journal of Health Studies* 23.4, 195-200. Online: <https://bit.ly/3giRhYm>.
- Bryła, P. (2016). «Organic food consumption in Poland: Motives and barriers». En: *Appetite* 105, 737-746. Online: <https://bit.ly/2SaKzK3>.
- Byrd, C. y col. (2008). «Risky Eating Behaviors of Young Adults - Implications for Food Safety Education». En: *Journal of the American Dietetic Association* 108.3, 549-552. Online: <https://bit.ly/32emzHU>.
- Cadarso, A. y col. (2017). «Calidad de vida relacionada con la salud y su relación con la adherencia a la dieta mediterránea y la actividad física en universitarios de Galicia (Health related to quality of life and their relationship with adherence to the mediterranean diet and physical activity at the university in Galicia)». En: *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria* 37.2, 42-49. Online: <https://bit.ly/3x0SY2y>.
- Das, M. y E. Evans (2014). «Understanding Weight Management Perceptions in First-Year College Students Using the Health Belief Model». En: *Journal of American College Health* 62.7, 488-497. Online: <https://bit.ly/3aiX6RR>.
- Dernini, S. y col. (2016). «Med Diet 4.0: the Mediterranean diet with four sustainable benefits». En: *Public Health Nutrition* 20.7, 1322-1330. Online: <https://bit.ly/3gghSp6>.
- Donini, L. y col. (2016). «A Consensus Proposal for Nutritional Indicators to Assess the Sustainability of a Healthy Diet: The Mediterranean Diet as a Case Study». En: *Frontiers in nutrition* 3.37, 1-14. Online: <https://bit.ly/3uZqogy>.
- Durá, T. y A. Castroviejo (2011). «Adherence to a Mediterranean diet in a college population». En: *Nutrición Hospitalaria* 26.3, 602-608. Online: <https://bit.ly/3aimili>.
- Dussailant, C. y col. (2016). «Evidencia actual sobre los beneficios de la dieta mediterránea en salud (Current evidence on the health benefits of the Mediterranean diet)». En: *Revista médica de Chile* 144.8, 1044-1052. Online: <https://bit.ly/3mRgcnm>.
- FAO (2012). *Sustainable Diets and Biodiversity*. 1st. Rome. Online: <https://bit.ly/3nEQv9Q>.
- Flaudias, V. y col. (2020). «COVID-19 pandemic lockdown and problematic eating behaviors in a student population». En: *Journal of Behavioral Addictions* 9.3, 826-835. Online: <https://bit.ly/3mRloHS>.
- Freire, W. y col. (2018). «Overweight, obesity, and food consumption in Galapagos, Ecuador: a window on the world». En: *Globalization and Health* 14.93, 1-9. Online: <https://bit.ly/3gg5plc>.
- García, M. y col. (2014). «Adherence to Mediterranean diet in a Spanish university population». En: *Appetite* 78, 156-164. Online: <https://bit.ly/3dn6s0S>.
- Gómez, R. (2018). «Revisión sobre el aceite de oliva: historia, impacto mediático y sus aplicaciones médicas en la dieta mediterránea (Review of olive oil: history, media impact and its medical applications in the Mediterranean diet)». En: *Revista Colombiana de Endocrinología, Diabetes & Metabolismo* 5.4, 26-31. Online: <https://bit.ly/3tqnPU5>.
- Gropper, S. y col. (2012). «Weight and Body Composition Changes during the First Three Years of College». En: *Journal of Obesity* 2012, 1-6. Online: <https://bit.ly/3e8N86X>.
- Guidi, J. y col. (2009). «The prevalence of compulsive eating and exercise among college students: An exploratory study». En: *Psychiatry Research* 165.1-2, 154-162. Online: <https://bit.ly/2Qu3n6g>.
- Hekler, E., C. Gardner y T. Robinson (2010). «Effects of a College Course About Food and Society on Students Eating Behaviors». En: *American Journal of Preventive Medicine* 38.5, 543-547. Online: <https://bit.ly/3upMxo0>.
- Hilger, J. y K. Diehl (2019). «'Oh God, I Have to Eat Something, But Where Can I Get Something Quickly?' A Qualitative Interview Study on Barriers to Healthy Eating among University Students in Germany». En: *Nutrients* 11.10, 2440. Online: <https://bit.ly/3ajn6N8>.
- Kearney, J. (2010). «Food consumption trends and drivers». En: *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences* 365.1554, 2793-2807. Online: <https://bit.ly/3gXjKTV>.
- Márquez, Y. y col. (2014). «Diseño y validación de un cuestionario para evaluar el comportamiento alimentario en estudiantes mexicanos del área de la salud (Design and validation of a questionnaire to evaluate eating behavior in Mexican students in the health area)». En: *Nutrición Hospitalaria* 30.1, 153-164. Online: <https://bit.ly/3x5aEtU>.

- Martínez, M. y col. (2015). «Benefits of the Mediterranean diet: insights from the PREDIMED study». En: *Progress in Cardiovascular Diseases* 58.1, 50-60. Online: <https://bit.ly/3ueZBfY>.
- Míguez, M. y col. (2013). «Variations of the diet of Galician university students (Ourense Campus) in relation to the pattern of the cardioprotective Mediterranean diet». En: *Nutrición Hospitalaria* 28.6, 2099-2106. Online: <https://bit.ly/3dpiPtx>.
- Miller, T., L. Chandler y M. Mouttapa (2015). «A needs assessment, development, and formative evaluation of a health promotion smartphone application for college students». En: *American Journal of Health Education* 46.4, 207-215. Online: <https://bit.ly/2QOzQ7R>.
- Navarro, I. y col. (2014). «Adherence to the Mediterranean diet by nursing students of Murcia (Spain)». En: *Nutrición Hospitalaria* 30.1, 165-172. Online: <https://bit.ly/3ebOpv1>.
- Paredes, M. y col. (2019). «Assessing responsible food consumption in three Ecuadorian city regions». En: *Sustainable Food System Assessment*. Routledge. Online: <https://bit.ly/3vATWRF>.
- Paslakis, G., G. Dimitropoulos y G. Katzman (2020). «A call to action to address COVID-19 induced global food insecurity to prevent hunger, malnutrition, and eating pathology». En: *Nutrition Reviews* 79.1, 114-116. Online: <https://bit.ly/3vA7LQr>.
- Racette, S. y col. (2005). «Weight Changes, Exercise, and Dietary Patterns During Freshman and Sophomore Years of College». En: *Journal of American College Health* 53.6, 245-251. Online: <https://bit.ly/3aW2JG5>.
- Reed, J. y col. (2011). «Using "Point of Decision Messages to Intervene on College Students Eating Behaviors"». En: *American Journal of Health Promotion* 25.5, 298-300. Online: <https://bit.ly/3tsM6sB>.
- Sánchez, M. y col. (2018). «Evaluación del estado nutricional de adolescentes en una Unidad Educativa de Ecuador (Evaluation of the nutritional status of adolescents in an Educational Unit of Ecuador)». En: *Ciencia Unemi* 10.25, 1-12. Online: <https://bit.ly/3v2v7h9>.
- Sogari, G. y col. (2018). «College Students and Eating Habits: A Study Using An Ecological Model for Healthy Behavior». En: *Nutrients* 10.12, 1823. Online: <https://bit.ly/2Q4eL9i>.
- Sproesser, G. y col. (2015). «I Eat Healthier Than You: Differences in Healthy and Unhealthy Food Choices for Oneself and for Others». En: *Nutrients* 7.6, 4638-4660. Online: <https://bit.ly/2QbSUN1>.
- VanHeuvelen, T. y J. VanHeuvelen (2019). «The (Economic) Development of Healthy Eating Habits: Gender, nutrition, and health outcomes in 31 countries». En: *Sociology of Development* 5.1, 91-113. Online: <https://bit.ly/2RHZBqC>.
- WHO (2014). *Global Status Report of noncommunicable diseases 2014*. Online: <https://bit.ly/3akfc60>.
- (2015). *Health in 2015: from MDGs, Millennium Development Goals to SDGs, Sustainable Development Goals*. Online: <https://bit.ly/2P20PvU>.



LOS GRUPOS DE ACCIÓN Y LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA DE ALTA PRODUCTIVIDAD PARA MAÍZ DE SECANO EN LOCALIDADES DEL PLAN PUEBLA, MÉXICO

THE ACTION GROUPS AND THE APPLICATION OF HIGH PRODUCTIVITY TECHNOLOGY FOR TEMPORARY CORN IN LOCATIONS OF THE PUEBLA PLAN, MEXICO

José Regalado-López^{*id}, Nicolás Pérez-Ramírez^{id}, Javier Ramírez-Juárez^{id} y
José Arturo Méndez-Espinoza^{id}

Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, México, Boulevard Forjadores de Puebla, Núm. 205, Santiago Momoxpan, Municipio de San Pedro Cholula. C.P. 72760, Puebla, México

*Autor para correspondencia: josere@colpos.mx

Manuscrito recibido el 06 de febrero de 2020. Aceptado, tras revisión, el 15 de abril de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

El objetivo del artículo es evidenciar la importancia que tienen los grupos de acción y la aplicación de tecnología no solo en la producción de maíz sino también en los ingresos económicos de los agricultores. Los grupos de acción constituyen el medio para hacer compras consolidadas de insumos, gestionar recursos financieros y favorecer una mejor comercialización del producto. La metodología consistió en sistematizar información del seguimiento de un grupo de acción constituido por diez productores que aplicaron tecnología mejorada para producir maíz; esta información se complementó con una encuesta socioeconómica de 30 agricultores de tres municipios. Los resultados indican que la integración de grupos de acción permite incrementar los rendimientos en casi un 50 % más respecto al grupo testigo, obteniendo una relación b/c de 2,44 en promedio. En conclusión, se produce un volumen de producción de maíz suficiente para satisfacer las necesidades de autoconsumo de las familias y excedentes para la venta; estos niveles de producción favorecen la reproducción de las familias rurales. Este artículo aporta información para la toma de decisiones en la implementación de programas de producción de maíz en otras localidades.

Palabras clave: Grupo de acción, tecnología, producción de maíz, Puebla.

Abstract

The aim of this study is to show the importance of action groups and the application of technology, not only in corn production but also in the economic income of farmers. Action groups are the means to make consolidated purchases of inputs, manage financial resources and promote better marketing of the product. The methodology consisted of systematizing information from the follow-up of an action group made up of ten producers who applied improved technology to produce corn; this information was complemented with a socioeconomic survey of 30 farmers from three municipalities. The results indicate that the integration of action groups allows to increase the yields by almost 50% more with respect to the control group and a b/c ratio is obtained, on average, of 2.44 on average. In conclusion, a sufficient volume of maize production is produced to satisfy the families' self-consumption needs and surpluses for sale. These production levels favor the reproduction of rural families. This article provides information for decision-making in the implementation of corn production programs in other locations.

Keywords: Action group, technology, corn production, Puebla.

Forma sugerida de citar: Regalado-López, J., Pérez-Ramírez, N., Ramírez-Juárez, J. y Méndez-Espinoza, J.A. (2021). Los grupos de acción y la aplicación de tecnología de alta productividad para maíz de secano en localidades del Plan Puebla, México. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 34(2):91-104. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.06>.

IDs Orcid:

José Regalado-López: <http://orcid.org/0000-0001-7548-4386>

Nicolás Pérez-Ramírez: <http://orcid.org/0000-0003-2233-3765>

Javier Ramírez-Juárez: <http://orcid.org/0000-0002-4993-6139>

José Arturo Méndez-Espinoza: <http://orcid.org/0000-0002-9733-4175>

1 Introducción

México es deficitario en producción de maíz a pesar de ser el centro de origen de esta planta cultivada. En la actualidad, según ASERCA (2019), se importan 16,2 millones de este grano. La causa de este déficit fue que el Gobierno federal, por muchos años, inclinó su política a la importación de maíz y abandonó la producción local, esto con la justificación de que era más barato importar el grano que producirlo, lo cual trajo consecuencias en la seguridad y soberanía alimentaria. No obstante, la mayoría de los pequeños productores de la agricultura familiar, sin el apoyo del Gobierno, continuaron produciendo maíz, grano básico para el consumo de las familias y para alimentación animal. Por otro lado, ante este limitado apoyo del gobierno a la producción local de maíz algunas instituciones como el Colegio de Postgraduados continuaron haciendo actividades de generación y difusión de tecnología para los pequeños agricultores, específicamente en la producción de maíz.

En la actualidad existe una política más favorable para producir maíz nacional, y la experiencia generada en el proceso de generación, difusión y aplicación de tecnología por el Colegio de Postgraduados y otras instituciones debe ser aprovechada para impulsar la producción de maíz local y disminuir la importación de este grano.

Concretamente la tecnología es un proceso combinado de pensamiento y acción cuya finalidad es crear soluciones útiles. En esta misma visión, Aguilar (2011) menciona que la tecnología es concebida como el conjunto de saberes, habilidades, destrezas y medios necesarios para llegar a un fin predeterminado. Por su parte, el Colegio de Postgraduados implementó este proceso de desarrollo tecnológico en terrenos de agricultores y consideró el conocimiento tradicional para generar tecnología de alta productividad apropiada a las condiciones de los productores y dar solución a una escasa producción de alimentos. La generación de tecnología no estuvo aislada de su difusión y escalamiento ya que estos procesos se realizaron por un equipo científico-técnico integrado y en constante comunicación.

Una de las estrategias del Colegio de Postgraduados para llevar a cabo la difusión y escalamiento de tecnología fue el asociativismo de los agriculto-

res para integrar grupos de acción; en este entorno e interacción entre distintos actores se propició un aprendizaje social, es decir, los participantes en el grupo de acción aprendieron mediante la observación, las demostraciones de tecnológicas, y de los componentes y procesos que integraron la estrategia de difusión y escalamiento.

Con relación a los grupos de acción, Friedmann (2001), señala que en aprendizaje social el eje central es el grupo de acción integrado por menos de doce personas y orientado a una tarea específica; en este enfoque el grupo de acción aprende de su propia práctica. Este mismo autor menciona que el método correcto para llevar dicho cambio, desde el punto de vista científico, es la experimentación social, la observación minuciosa de los resultados y la voluntad de admitir los errores y aprender de ellos.

El programa Plan-Puebla fue una estrategia de desarrollo agrícola que se operó en el Valle de Puebla. Esta estrategia se sustentó en tres sectores: los productores, las instituciones del sector y un equipo técnico del Colegio de Postgraduados. El equipo técnico fue encargado de generar, difundir y aplicar la tecnología. A través de este programa de desarrollo agrícola el cambio social se alcanzó a través del incremento de la producción de maíz mediante la generación y aplicación de tecnología y la formación de grupos solidarios. En otro contexto mexicano, Regalado, Niño y López (2005) en el Istmo de Tehuantepec utilizaron una estrategia para llevar a cabo la experimentación social en proyectos conducidos con asociaciones de productores, principalmente con la población indígena; las variables que integran la estrategia son: 1) información, 2) participación de los actores involucrados, 3) generación de iniciativas, 4) acción y 5) desarrollo.

Por su parte Cazorla, De Los Ríos y Salvo (2013) y Cazorla, Ríos y Afonso (2018), desarrollaron el modelo denominado *working with people* (trabajando con la gente); este modelo se entiende como una práctica profesional desarrollada en cooperación, que busca conectar conocimiento y acción mediante proyectos en común que integran aprendizajes y valores en las personas (grupos de acción) que participan en trabajos conjuntos. Este modelo ha tenido una amplia aplicación con resultados favorables en Europa y otros países.

Las experiencias citadas evidencian la importancia de los grupos de acción y del proceso de experimentación social en el ámbito agrario. Una prueba del alcance que tuvo el programa de desarrollo Plan-Puebla con estos grupos y aprendizaje social se demostró en la localidad de Tlaltenango; los agricultores de esta comunidad en el inicio del programa producían rendimientos de entre 600 y 800 kg/ha y después del finalizado el programa alcanzaron niveles de producción de 7000 kg/ha; con estos rendimientos de maíz resolvieron las necesidades de grano para la familia y el excedente se destinó para la alimentación de ganado y para la venta, además las familias mejoraron sus ingresos y bienestar. Con estos logros los productores no tienen necesidad de complementar sus ingresos con actividades fuera de finca, contrario a lo que sucede en otros ámbitos (Chapman y Tripp, 2004; citado en Maziya, Mudhara y Chitja (2017)).

En este contexto se plantean las siguientes interrogantes: ¿en qué consistió el proceso de experimentación social en el programa de desarrollo Plan-Puebla? ¿cuál fue el papel que desempeñaron los beneficiarios y grupos de acción para producir los cambios favorables en la producción maíz?

El tema que se aborda en este artículo es importante ya que en México existe un déficit importante en la producción de maíz y es necesario aplicar acciones que permitan disminuirlo. Los grupos de acción, con sustento en la difusión y aplicación de tecnología, también son relevantes puesto que son una alternativa para mejorar la producción, los ingresos y el bienestar de los agricultores; sin embargo, este conocimiento había sido poco aprovechado dada la existencia de una política desfavorable para la producción interna. En el actual escenario de una política más propicia para ser autosuficientes este conocimiento puede ser un insumo importante para contribuir a la producción de maíz. El objetivo de este estudio fue analizar un estudio de caso, en tres municipios de Puebla, para evidenciar la importancia que tienen los grupos de acción y la aplicación de tecnología, no solo en el incremento de los rendimientos de maíz sino también en el ingreso y bienestar de los agricultores.

2 Metodología

Esta investigación se sustentó en un estudio de caso que, de acuerdo con Yin (1994) citado por Arzaluz (2005), es una estrategia de investigación que permite organizar datos sociales sin perder de vista el conjunto de las relaciones del fenómeno que se estudia; además, emplea algunos elementos de tipo cualitativo y cuantitativo (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Las etapas de la investigación fueron: talleres participativos con informantes clave de amplia experiencia en la producción de maíz; integración de grupos de acción con productores sobresalientes; establecimiento de parcelas demostrativas en terrenos de agricultores; y escalamiento de la experiencia a otros productores; a estas actividades se les dio seguimiento y al final de los ciclos agrícolas se hicieron estimación de rendimientos en las parcelas.

Para tener una caracterización del contexto socioeconómico, se entrevistaron a 30 productores de las localidades de Tlaltenango, Santa Ana Xalmimulco y Calpan. El instrumento fue un cuestionario que integró preguntas sobre las características de los productores y sus familias.

La información de las distintas etapas de la investigación fue sistematizada y los datos de la encuesta fueron capturados en el programa Excel para estimar parámetros básicos del conjunto de datos.

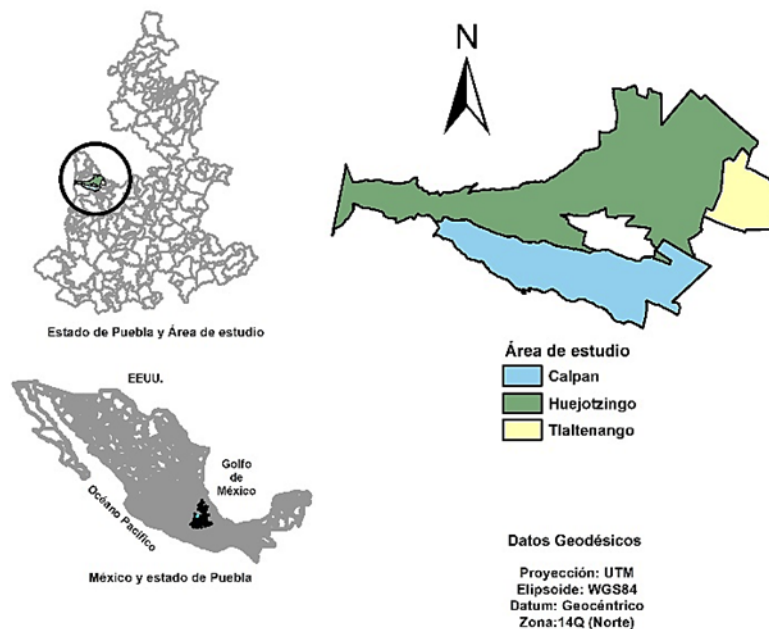
2.1 Área de estudio

El área de estudio abarcó a tres municipios del estado de Puebla e integran la Microrregión de Atención Prioritaria de Huejotzingo (MAP) (Figura 1). En el municipio de Tlaltenango se generó la experiencia, en el territorio Huejotzingo se escaló la experiencia generada y la municipalidad de Calpan se consideró como testigo para hacer un comparativo de los resultados. La MAP, de acuerdo con el Colegio de Postgraduados (2015), es conceptualizada como un espacio geográfico donde convergen problemas sustantivos de carácter productivo, ambiental o social, y en donde los Campus del COLPOS, a través de sus académicos, definen áreas de influencia para realizar actividades de vinculación y transferencia tecnológica, de manera organizada, y sistematizada, retroalimentando las actividades de educación e investigación.

Las actividades agropecuarias constituyen la fuente principal de ingresos de la población. De acuerdo con datos de INEGI (2007), en el área existían 12 949 unidades, de las cuales con actividades agropecuarias sumaban un total de 9 710 y sin actividades agropecuarias 3 239 unidades. Sobre una superficie de 33616,7 ha, estas unidades desarrollaron una agricultura de temporal, en la que con base al conocimiento y los recursos disponibles emplean estrate-

gias que les permite asegurar las necesidades internas de las unidades y una mayor participación en el mercado local. Las estrategias consisten en dos sistemas productivos; 1) un sistema basado en la producción de maíz combinado con la producción de leche y carne, y 2) sistema tradicional de maíz intercalado en árboles frutales; la primera prevalece más en el municipio de Tlaltenango y en la localidad de Santa Ana Xalmimilulco y la segunda en Calpan.

Figura 1. Municipios que integran el área de estudio



Datos espaciales georeferenciados tomados del INEGI, (2012).

2.2 Los grupos de acción

En San Pedro Tlaltenango, el grupo de acción se integró por productores de maíz que combinan la producción del grano con la ganadería. En San Ana Xalmimilulco el grupo se conformó como una Sociedad de Producción Rural (SPR), figura legal establecida para llevar a cabo procesos de producción, comercialización, entre otras actividades. Mientras que en San Andrés Calpan se identificaron a siete productores individuales, en cuyas parcelas se realizaron estimaciones de rendimiento para conocer sus niveles de producción de maíz.

Estos grupos practican dos sistemas productivos relacionados con la producción de maíz. El primero consiste en un sistema basado en la producción de

maíz en condiciones de secano que se combina con la producción de leche y carne; y el segundo en un sistema tradicional de maíz intercalado en árboles frutales. El primero prevalece más en el municipio de Tlaltenango, y en la localidad de Santa Ana Xalmimilulco, mientras que el segundo se utiliza más en el municipio de Calpan. En ambas localidades se identificaron productores clave para dinamizar procesos para la formación de los grupos de acción; para el caso de Tlaltenango, uno de los líderes de la producción de maíz desempeñó este papel y en Santa Ana Xalmimilulco, el representante de la Sociedad de Producción Rural fue el representante del grupo; cada uno de estos productores asumió responsabilidades en sus localidades. Para el caso de

Tlaltenango, el responsable tuvo el rol de presidente del Comité de Decisiones del Programa Intensivo para la Producción de Maíz, y en Santa Ana Xalmimulco el responsable de grupo se ocupó de los cargos y actividades comunitarias.

3 Resultados y discusión

El proceso de experimentación social generó evidencias en variables sobre: información de la tecnología empleada (dosis de fertilización), integración y comportamiento de los productores de los grupos de acción y factores institucionales.

Tecnología empleada

La tecnología que provocó cambios en la producción de maíz se generó bajo el enfoque diseñado por Laird (1977) consistente en desarrollar los trabajos experimentales en terreno de los propios productores, utilizando los componentes del método científico, que por sus ventajas se introdujo en el Plan Puebla (CIMMYT, 1974).

Este enfoque presentó ventaja en la etapa de difusión porque mantenía constantes las prácticas agrícolas que realizaban los productores. Los componentes de la tecnología fueron 130 kilogramos de nitrógeno, 40 kilogramos de fósforo para una densidad de población de 50 000 mil plantas ha^{-1} . Posteriormente, se aumentaron los niveles de nitrógeno, fósforo y se adicionó potasio, utilizando semillas mejoradas y una densidad de población de 60 000 plantas ha^{-1} , para obtener mayor volumen de grano y forraje. Durante el periodo de 1967 a 1992, se constató que se habían producido cambios en la producción de maíz (Díaz y col., 1999), y se notó la presencia de productores de Tlaltenango con niveles de producción de más de 6 ton/ha (Regalado y col., 1996). La información tecnológica en el diagnóstico se expone en los siguientes párrafos.

Fertilización: con base en la Tabla 1, se aprecia la relación entre los niveles de aplicación de fertilizantes, uso de semillas híbridas y rendimientos por hectárea. Los datos muestran una diferencia en algunos casos de más del 50% entre el volumen de

grano producido con materiales mejorados que con materiales nativos.

Tabla 1. Dosis de fertilización y niveles de producción con el uso de semilla mejorada y criolla.

Productor	Dosis kg ha^{-1}			Rendimiento t ha^{-1}	
	N	P	K	Híbrida	Criolla
Productor I	174	46	—	8,2	4,0
Productor II	150	57	—	8,0	5,0
Productor III	128	46	30	4,5	4,0
Productor IV	165	69	—	7,5	3,5
Productor V	142	69	—	6,2	4,0

Fuente: Taller sobre "reconocimiento de la tecnología local de producción"

Los funcionarios públicos tienen la idea de que el ingreso de los productores de maíz es muy bajo, e incluso a veces presentan pérdidas, sin embargo, los cálculos de los costos y beneficios demostró lo contrario, tal como se muestra en el Tabla 2. Este cálculo se realizó considerando el costo de \$4.0 por kilogramo de maíz. La relación beneficio costo resultó positiva incluso con un rendimiento de 4,5 t/ha. Este ingreso se obtiene únicamente del grano sin considerar el forraje, ahora, si se consideran que ambos productos se destinan para la alimentación del ganado y de este último se obtienen carne y leche, entonces las ganancias son mayores.

Este análisis demuestra que la producción de maíz es rentable. En el ámbito social, la introducción de los componentes tecnológicos contribuyó a generar condiciones para fortalecer este tipo de iniciativas en el ámbito comunitario, considerando las experiencias para mejorar los procesos productivos y provocar cambios en la arquitectura institucional. Desde el componente ambiental, Turrent (2019) señala que los resultados de estudios llevados a cabo en trigo con dosis agronómicas NPK todos los años, con y sin corrección de acidez del suelo, con y sin rotación de cultivos, con y sin incorporación de estiércol demuestran que el uso de dosis agronómicas de fertilizantes actúa como degradante del suelo a largo plazo. Sin embargo, es necesario realizar estudios más específicos relacionados con el impacto de los componentes tecnológicos sobre el agua.

Tabla 2. Costos de producción (\$), rendimiento (t/ha) y relación b/c en el cultivo de maíz en Tlaltenango

Concepto	Productores participantes				
	Benito Cordero	Ignacio Pérez	Crescencio Lima	Heliodoro Lima	Aron Lima
Preparación del terreno y siembra					
Rastra	(3) 900	(2) 600	(2) 600	(2) 600	(2) 600
Barbecho	(1) 600	(1) 600	(1) 600	(1) 600	(1) 600
Rastra de colmillo	(1) 250	(1) 250	(1) 250	(1) 250	—
Surcado	—	(1) 250	(1) 250	(1) 250	—
	Sembradora de precisión	Tiro animal	Tiro animal	Tiro animal	Sembradora de precisión
Maq. y yuntero	600	500	500	500	600
Costo de semilla	1200	1 200	1 200	1 200	1200
Costo de fertilización					
18-46-00	1 520	950	1 140	1 140	760
Urea	1 380	1 265	1 380	1 150	920
Potasio	—	—	—	—	400
1 aplicación	250	250	300	300	300
Labrada	300	300	300	300	300
2 aplicación	300	300	300	300	300
Costo de control de maleza					
Agroquímico	270	280	270	130	330
Aplicación	200	200	200	200	200
Costos de control de plagas (no aplica)					
Costos de siega y amogotado					
\$14/ surcos	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300
Costos de pizca o cosecha					
Jornales	2 000	2 000	1 500	1 200	1 000
Costo de desgranado					
Jornales	420	420	200	350	300
Desgranadora	350	350	250	250	250
Acarreo	500	500	500	500	500
Rendimiento, costo total y relación b/c					
Toneladas/ha	8,2	8,0	7,5	6,0	4,50
Costo total/ha	12 340	11 515	11 040	10 520	9 860
Relación b/c	2,65	2,77	2,71	2,28	1,80

Los números que aparecen entre paréntesis en el rubro de preparación de suelos y siembra indican la frecuencia con que realizaron estas actividades.

Grupo de acción de Tlaltenango

La experiencia de estos productores llevó a plantear la siguiente interrogante ¿cómo visibilizar la apropiación de la tecnología generada para la producción de maíz que les permite mejorar sus ingre-

sos y permanecer en su comunidad sin necesidad de inmigrar? La respuesta consistió en seleccionar a los 10 mejores productores de este municipio para formar un grupo de acción que fueran conductos para transferir este conocimiento a otros productores tanto de la localidad como fuera de ella, así como a directivos de instituciones local, estatal

y federal, buscando incorporar la experiencia en la política pública para la producción de maíz. La estrategia de seleccionar a los mejores productores de maíz coincidió con el trabajo planteado por Manrubio y H. (2010), que consideró el principio de construir sobre lo que saben los mejores. Construir sobre los que otros saben implica trabajar con la gente, una línea de investigación desarrollado por el Grupo GESPLAN, que de acuerdo con Cazorla, De Los Ríos y Salvo (2013) incorpora elementos clave de la planificación como aprendizaje social, participación colaborativa y modelos de dirección de proyectos. Con base a estos elementos, el grupo estableció 10 ha de lotes demostrativos para exponer la aplicación de tecnología de alta productividad y obtener altos rendimientos de maíz; en el Tabla 3 se muestran las fuentes y volumen de fertilizante empleado.

Tabla 3. Rendimientos ($t\ ha^{-1}$) obtenidos por los primeros y segundos participantes en Tlaltenango

Productores	Primeros participantes			
	2011	2012	2013	2014
Productor I	7,8	10,4	7,2*	9,76
Productor II	7,9	10,6	9,1**	10,94
Productor III	5,8	5,1	8,2***	9,44
Productor IV	6,8	8,8	8,8**	8,00
Productor V	9,2	10,9	8,5**	9,7
Productor VI	7,3	9,2	10,8**	9,1
Productor VII	6,2	12,3	10,7**	10,5
Productor VIII	5,0	9,1	8,8*	9,4
Productor IX	9,4	9,6	10,6**	8,3
Productor X	6,9	7,9	6,0*	—
Promedio	7,2	9,4	8,9	9,5
Productores	Segundos participantes			
	2011	2012	2013	2014
Productor XI	—	—	10,7***	7,5
Productor XII	—	—	7,9*	6,8
Productor XIII	—	—	8,8***	6,4
Productor XIV	—	—	9,4*	11,4*
Productor XV	—	—	10,8*	1,1
Productor XVI	—	—	9,7***	9,7
Productor XVII	—	—	7,6*	8,5
Promedio	—	—	9,3	8,8

Datos obtenidos de trabajo de campo 2012-2015. Nota (*) Semilla HS-2 del Colegio de Postgraduados, (**) Semilla Niebla, (***) Semilla ASPROS.

El Colegio de Postgraduados (CP)-Campus Puebla financió en este primer año la siembra de las 10 hectáreas. Con este recurso cada productor estableció una hectárea con fines demostrativos y el resto de la superficie que tienen bajo su control se finan-

ció por ellos mismos; en términos de porcentaje, el monto aportado por el CP representó el 30% de los costos de producción por hectárea, y el 70% restante se aportó por cada uno de los integrantes del grupo. En términos de financiamientos y como resultado del primer año, se generó un esquema para la producción de maíz que se operó en los siguientes años y que consistió en la aportación del 50% de la presidencia municipal y el otro 50% se cubriría por el grupo de acción. Bajo este esquema en este segundo año, se amplió la superficie a 147 ha aproximadamente y el grupo adquirió una sembradora de precisión. En el tercer año se amplió el programa a un mayor número de productores, en su mayoría jóvenes que después de su experiencia migratoria incursionaron nuevamente en las actividades agropecuarias. Fue muy interesante observar que el grupo de los primeros participantes estableció como requisito para los productores de nuevo ingreso el obtener un rendimiento mínimo de $6,0\ t\ ha^{-1}$, para recibir el financiamiento de la presidencia municipal. En términos de rendimientos y con base al Tabla 4, se observó que en el comportamiento en los niveles de producción de maíz durante el primer año (2011), los iniciadores del proyecto registraron un volumen de producción promedio de $7,24\ t\ ha^{-1}$, nivel de producción que se sostiene durante el periodo de 2013-2014, también, hubo casos en el que algunos miembros del grupo obtuvieron rendimientos mayores a $10\ t\ ha^{-1}$. Estos niveles de rendimientos superaron los niveles de producción de 2,2 hasta $3,7\ t\ ha^{-1}$ planteado por la estrategia de Mas Agro, un programa nacional dirigido a homogenizar el nivel de producción de maíz en condiciones de temporal entre los pequeños productores (Turrent y col., 2017).

Entre los integrantes del grupo de acción se generalizó el uso de semilla mejorada, sin embargo, a nivel de la localidad este uso es bajo. De acuerdo con Espinosa, Sierra y Gómez (2003) este tipo de comportamiento es similar con respecto al uso de semillas mejoradas a nivel nacional.

Escalamiento en otras localidades

Con base a los resultados obtenidos y por la iniciativa de producir la semilla HS-2 propiedad del Colegio de Postgraduados por una empresa familiar a través de un convenio de colaboración y por el interés de un grupo de acción integrados en una

figura jurídica como Sociedad de Producción Rural (SPR) por utilizar esta semilla, la presidencia municipal de Huejotzingo, municipio al que pertenece la localidad de Santa Ana Xalmimilulco, diseñó y operó un esquema similar de financiamiento utilizado por el grupo de acción de Tlaltenango.

Santa Ana Xalmimilulco

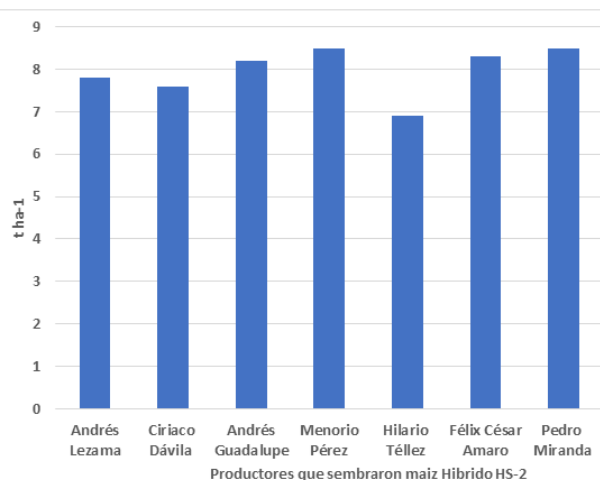
Los factores que determinaron la formación y participación del grupo de acción en el proyecto de maíz HS-2 fueron: 1) la participación del responsable del grupo de Santa Ana Xalmimilulco en el Consejo Municipal de Desarrollo Rural Sustentable de San Miguel Huejotzingo, 2) intercambio de experiencia sobre el uso de semillas híbridas con los productores de San Pedro Tlaltenango, y 3) participación de algunos integrantes del grupo en un proyecto piloto para introducir maíz híbrido HS-2 entre los productores. Estas acciones crearon las condiciones para que los productores participaran en la siembra de 100 ha del maíz híbrido HS-2 (Regalado y col., 2010). Los resultados de esta primera experiencia en Santa Ana Xalmimilulco corroboraron la posibilidad de elevar los niveles de rendimientos tanto de grano y forraje mediante la aplicación más precisa de los componentes tecnológicos, incluyendo el uso de esta semilla. Con base a los datos de rendimientos de los primeros integrantes que utilizaron esta semilla tal como se muestra en la Figura 2, se demostró que el uso de este material representaría una alternativa para obtener un mayor volumen de grano para abastecer a la unidad de producción y forraje verde para el ensilado y seco que se utiliza durante todo el año, en cantidad suficiente y de calidad para apoyar a la actividad ganadera, con el propósito de mantener o elevar la producción de leche que, según los propios productores, se estima en un volumen de 90 mil litros diarios.

San Andrés Calpan (productores testigo)

Durante los tres primeros años de la operación del proyecto de producción de maíz aplicando tecnología de alta productividad, las estimaciones de rendimientos se llevaron a cabo en terrenos de los integrantes de los grupos de acción, sin embargo, y con el propósito de conocer las diferencias en llevar a cabo o no la producción de maíz en forma de grupo de acción, en el año 2014, además de realizar es-

timaciones de rendimientos en lotes de productores de los dos grupos de acción, se consideró a un grupo de productores de Calpan que sembraron maíz durante el ciclo primavera-verano 2014, sin participación en programas implementados en Tlaltenango y Santa Ana Xalmimilulco.

Figura 2. Rendimientos en $t\ ha^{-1}$ obtenidos en el proyecto de maíz HS-2



Comparación de variables tecnológicas y características personales de productores con y sin grupos de acción

Este análisis se sustenta en la información recabada mediante la aplicación de un cuestionario que incluyó variables relacionadas a los niveles de rendimientos de maíz, componentes tecnológicos empleados, y otros factores de carácter personal de los integrantes de los grupos de acción, así como de productores testigo.

Rendimientos de maíz

Con base a los datos del Tabla 5, se puede observar una relación entre los grupos de acción y los rendimientos de maíz, sobre todo en lo que respecta al rendimiento promedio y el máximo. Dicho comportamiento se puede considerar para establecer que la aplicación de los componentes tecnológicos se aplica con mayor precisión cuando los productores se encuentran integrados en un grupo de acción, dado que la consecución de los recursos financieros para la obtención de los insumos en tiempo y calidad es posible hacerlo a través de estas asociaciones.

Tabla 4. Rendimientos obtenidos con y sin grupo de acción

Grupo de acción	Integrantes por grupo	Rendimiento t ha ⁻¹		
		Promedio	Mínimo	Máximo
Tlaltenango	16	8.9	4.3	11.4
Santa Ana Xalmimilulco	7	7.8	6.5	12.3
Calpan (Testigo)	7	4.4	2.4	6.4

Elaboración propia con datos de campo, 2015.

La relación entre el uso de la tecnología sobre los rendimientos de maíz se aborda en diferentes estudios (Regalado y col., 1996; Díaz y col., 1999; Damián y col., 2007), quienes coinciden con los resultados obtenidos en Tlaltenango; en la misma línea Gürel (2019) coincide en que los avances en la agricultura a menudo han sido el resultado de innovaciones en componentes individuales (como mejoramiento, insumos químicos, tecnologías de riego), sin embargo, en Tlaltenango como en Santa Xalmimilulco los cambios se produjeron considerando como variable la aplicación del conocimiento tecnológico a través de los grupos de acción. Noriega y col. (2019) relacionan la capacitación y difusión de innovaciones tecnológicas bajo el modelo de escuelas de campo con la productividad de maíz; y en este mismo sentido Velázquez y col. (2019) encontraron que la adopción de tecnologías determina la productividad y competitividad de la producción de maíz. Estos cambios en la producción de maíz generan excedentes de grano y forraje, que como señala Lutz y Herrera (2007) pueden incidir positivamente en las familias y comunidades. Si bien los productores de Tlaltenango y Santa Ana Xalmimilulco se apropiaron de los componentes tecnológicos para producir niveles altos de rendimientos de maíz, la consecución de los recursos para adquirir los insumos para su aplicación se hace efectiva siempre y cuando los productores realicen esta práctica como grupos de acción, tal como se llevó a cabo en Tlaltenango y posteriormente en Santa Ana Xalmimilulco.

Como instrumento de captación de información de campo se utilizó un cuestionario para recabar información de los integrantes de los grupos de acción, así como de los productores testigo. En el Tabla 6 se observan los componentes tecnológicos

que emplearon los productores durante el ciclo agrícola 2014 para producir cambios en la producción de maíz. Con base a esta información, se pudo observar que en las localidades donde se llevaron a cabo las actividades como grupos de acción, los productores aplicaron con mayor precisión los componentes tecnológicos generados por la investigación agronómica del Plan Puebla, utilizaron semilla mejorada y la mayoría realizaron prácticas de conservación de humedad, lo que les permitió sembrar durante el mes de abril y lograr una germinación más homogénea de la semilla.

Características de los productores que integraron los Grupos de Acción

Con base a la información captada en campo mediante la aplicación de cuestionarios, se observó que 80% de los jefes de familias de las localidades son de sexo masculino, pocas mujeres están al frente de las unidades familiares tomando decisiones en la producción agrícola, más bien, su participación consiste en apoyar otras actividades en el hogar como el cuidado de los miembros de la familia y en la preparación de alimentos para los jornaleros durante la cosecha.

Con respecto a la edad, en Calpan se observó una mayor población adulta y con menor número de años de estudios; mientras que, en los dos grupos de acción se notó mayor población joven; en este sentido se destaca el caso de un integrante que inmigró a los Estados Unidos de América y una vez retornado a Tlaltenango, incursionó en las actividades agropecuarias. Actualmente las familias de los y las integrantes de las tres localidades permanecen en la comunidad, realizando actividades hacia el interior y fuera de la unidad familiar.

Tabla 5. Componentes tecnológicos empleados por los grupos de acción para la producción de maíz de temporal

Prácticas tecnológicas	Tlaltenango (Grupo de acción)		Sta. Ana Xalmimilulco (Grupo de acción)		Calpan (Testigo)	
	Modalidad	%	Modalidad	%	Modalidad	%
Prácticas de conservación de humedad	1 a 3	93	1 a 3	66	1 a 3	42
Fecha de siembra	Abril	56	Abril	66	Abril	57
Implemento utilizado	Tractor	75	Tractor y yunta	66	Tractor y yunta	42
Tipo de semilla	Mejorada	100	Mejorada	100	Criolla	100
Color de grano	Blanco	62	Blanco	77	Blanco	100
Aplica fertilizantes	Si	100	Si	100	Si	100
Tipo de fertilizantes	Urea 46 %	62	Urea y negro	33	Urea	57
Época de aplicación (etapa)	En 1° y 2° labor	50	En 1° y 2° labor	66	En 1° y 2° labor	85
Aplicación de estiércol	Si	81	Si	100	Si	57
Tipo de estiércol	Varios	81	Varios	100	Varios	57
Cantidad de estiércol	100-200 t ha ⁻¹	37	40-50 t/ha	55	Sin datos	42
Frecuencia de aplicación	Una vez por año	43	Cada tres años	44	Una vez por año	57
Época de cosecha	Noviembre	93	Noviembre	55	Noviembre	57

Fuente: Elaboración propia con datos de campo, 2014.

Tabla 6. Edad y años de estudio de los integrantes de los Grupos de Acción

Grupos de acción	Edad			Años de estudios		
	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.
Tlaltenango	53	23	82	8	6	17
Santa Ana Xalmimilulco	56	43	77	8	3	15
Calpan (Testigo)	70	60	86	3	0	12

Fuente: Elaboración propia con datos del trabajo de campo 2014.

Los grupos de acción y la estrategia de gestión

Los grupos de acción gestionaron un conjunto de componentes que constituyeron la estrategia pa-

ra aplicar la tecnología y producir altos rendimientos de maíz, estos componentes fueron: insumos, semillas, financiamiento, asistencia técnica y proceso de comercialización.

Insumos

El grupo de acción de Tlaltenango generó una serie de decisiones relacionadas con la adquisición de insumos y semilla de forma consolidada con la empresa que ofreciera mejor calidad de los productos y pesos completos. Estas decisiones se fundamentaron sobre las experiencias de algunos socios integrantes de los grupos, así como la ventaja de disponer recursos económicos que le otorgó una autonomía económica que le permitiera una mejor negociación para adquirir los insumos a un mejor precio y de manera oportuna. En el primer año de operación del proyecto el grupo de Tlaltenango, en coordinación con el Campus Puebla, compraron sus insumos de forma consolidada un mes antes de la siembra. En el segundo año, la presidencia municipal participó en el proyecto e intentó hacer la compra con otra empresa y con los mismo productos, buscando abaratar aún más el precio de los insumos; dicha propuesta no prosperó porque el grupo solicitó al proveedor un análisis del producto para corroborar que el porcentaje de ingrediente activo era el mismo que aparecía en el envase, esta se negó a presentarla lo que ocasionó que el presidente municipal, a través de la regiduría de agricultura, realizara la compra con la empresa que sugirió el grupo.

Financiamiento

En Tlaltenango se generó un esquema de financiamiento que en los programas de desarrollo rural en Europa se denomina gestión próxima de financiamiento (Cazorla, Ríos y Díaz, 2005). Este esquema consistió en una mezcla de recursos de los beneficiarios y de la autoridad local en forma de subsidio, evitando el endeudamiento que constituye un factor que limita el acceso al financiamiento (Almeraya y col., 2011). La incorporación de las autoridades locales en este tipo de proyecto permitió una relación más estrecha con los grupos, sobre todo para planificar acciones como: definición de beneficiarios, superficie sembrada, necesidades de insumos, monto a aportar por las instancias involucradas, propuesta de posibles proveedores, definición de tipo de fertilizantes, solución de problemas derivados en el proceso de compra, recorridos de campo, y estimación de cosecha.

Asistencia técnica

En el estudio realizado por Afful y col. (2015), se demostró que los productores de maíz, al recibir información de la extensión pública, aumentaron sus niveles de producción de maíz en condiciones de secano. Estos resultados coinciden con la iniciativa desarrollada en Tlaltenango, que se sustentó bajo la premisa de que los productores disponen de un conocimiento acumulado sobre el manejo del cultivo de maíz y que la labor del técnico debía ser de facilitador. La asistencia técnica consistió en facilitar información de carácter técnico y sobre las ventajas que disponían como grupo para llevar a cabo procesos de gestión con otros actores.

4 Conclusiones

La integración de un grupo de acción con los mejores productores de maíz de Tlaltenango para transmitir sus experiencias mediante el establecimiento de lotes demostrativos con la participación del Colegio de Postgraduados y de autoridades locales constituyó una estrategia para producir cambios en la producción de maíz.

El proceso de aprendizaje social contribuyó a la creación de grupos de acción que definieron: 1) componentes tecnológicos que se aplicarían en los módulos demostrativos, 2) estrategia para la gestión de insumos, 3) el establecimiento de las relaciones con actores institucionales y locales, y 4) una asistencia técnica para facilitar procesos en el ámbito técnico y gestión de financiamiento; acciones que crearon las condiciones para que el grupo demostrara su capacidad para producir cambios en la producción de maíz, y la viabilidad de este cultivo.

Es posible incorporar la experiencia generada por los grupos de acción en un programa estatal más amplio de producción de maíz, en zonas con mayor potencial para la producción de maíz de secano, mediante una gestión más de carácter empresarial que permita integrar a este tipo de agricultura en la red de valor; para ello se requiere de voluntad política de actores que toman decisiones a este nivel.

Referencias







- ASERCA (2019). «Reporte del mercado de maíz». Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria. Consultado 26 de noviembre 2020. Online: <https://bit.ly/2WlxKsS>.
- Afful, D. y col. (2015). «Contribution of Public Extension to Food Security of Smallholder Farmers in Limpopo Province, South Africa in an Era of Climate Variability». En: *Journal of Human Ecology* 50.3, 205-212. Online: <https://bit.ly/3fUHLsJ>.
- Aguilar, F. (2011). «Reflexiones filosóficas sobre la tecnología y sus nuevos escenarios». En: *Sophía* 11, 123-172. Online: <https://bit.ly/3vD64lw>.
- Almeraya, S. y col. (2011). «Uso del crédito: implicaciones para el desarrollo rural». En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 2.1, 111-124. Online: <https://bit.ly/34xzuWC>.
- Arzaluz, S. (2005). «La utilización del estudio de caso en el análisis local». En: *Región y sociedad* 17.32, 107-144. Online: <https://bit.ly/2R3GnM0>.
- CIMMYT (1974). *El Plan Puebla, siete años de experiencias, 1967-1973*. Centro Internacional de mejoramiento de maíz y trigo. México.
- Cazorla, A., I. De Los Ríos y M. Salvo (2013). «Working With People (WWP) in rural development projects: A proposal from social learning». En: *Cuadernos de desarrollo rural* 10.SPE70, 131-157. Online: <https://bit.ly/3yLT9jk>.
- Cazorla, A., I. De los Ríos y A. Afonso (2018). «Conclusiones». En: *Jornadas de diálogo para la inclusión de los Principios para la Inversión Responsable en la Agricultura (IAR) y las Directrices Voluntarias de Gobernanza de la Tierra (DVGT) en el ecosistema universitario de Latinoamérica*. Online: <https://bit.ly/3fRyaD4>.
- Cazorla, A., I. de los Ríos y J. Díaz (2005). «La iniciativa comunitaria LEADER como modelo de desarrollo rural: aplicación a la región capital de España». En: *Agrociencia* 39.6, 697-708. Online: <https://bit.ly/3cnyZTp>.
- Colegio de Postgraduados (2015). *Plan rector institucional*. Online: <https://bit.ly/3yKvujr>.
- Damián, M. y col. (2007). «Tecnología agrícola y territorio: el caso de los productores de maíz de Tlaxcala, México». En: *Investigaciones geográficas* 63, 35-55. Online: <https://bit.ly/2RWznRE>.
- Díaz, C. y col. (1999). *Análisis de una estrategia de desarrollo de la agricultura tradicional*. Colegio de Postgraduados México. México.
- Espinosa, A., M. Sierra y N. Gómez (2003). «Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE». En: *Agronomía mesoamericana* 14.1, 117-121. Online: <https://bit.ly/3wESVIM>.
- Friedmann, J. (2001). *La planificación en el ámbito público*. Ministerio de administraciones públicas.
- Gürel, B. (2019). «The role of collective mobilization in the divergent performance of the rural economies of China and India (1950-2005)». En: *The Journal of Peasant Studies* 46.5, 1021-1046. Online: <https://bit.ly/3fYKBwL>.
- Hernández, S., C. Fernández y L. Baptista (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- INEGI (2007). *Censo agrícola, ganadero y forestal*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Online: <https://bit.ly/3fyo8HV>.
- Laird, R. (1977). *Investigación agronómica para el desarrollo de la agricultura tradicional*. Colegio de Postgraduados.
- Lutz, B. y F. Herrera (2007). «Organizaciones de productores de maíz en el Estado de México: papel de las instituciones e importanciade las coyunturas políticas». En: *Ciencia Ergo Sum* 14.1, 15-26. Online: <https://bit.ly/3wKIO6p>.
- Manrribio, R. y Santoyo H. (2010). «Del extensionismo agrícola a las redes de innovación rural». En: Universidad Autónoma Chapingo. Cap. Del extensionismo a las redes de innovación, págs. 31-67.
- Maziya, M., M. Mudhara y J. Chitja (2017). «What factors determine household food security among smallholder farmers? Insights from Msinga, KwaZulu-Natal, South Africa». En: *Agrekon* 56.1, 40-52. Online: <https://bit.ly/34wH9nN>.
- Noriega, D. y col. (2019). «Adopción de innovaciones en maíz bajo el modelo escuelas de campo en Tlalcozotitlán, Guerrero». En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 10.8, 1903-1909. Online: <https://bit.ly/3fRcYNm>.
- Regalado, J., E. Niño y G. López (2005). «Generación y transferencia de una semilla de maíz, una experiencia en el plan regional Tehuantepec, Oaxaca, México». En: *Actas del congreso internacional de dirección e ingeniería de proyectos 2002-2010*. Online: <https://bit.ly/2SKZfQB>.

- Regalado, J. y col. (1996). «Factores asociados a la utilización de la tecnología de alta productividad entre productores de maíz de temporal». En: *Agrociencia* 30.1, 139-146. Online: <https://bit.ly/3fCuKVZ>.
- Regalado, L. y col. (2010). *Revalorización de los sistemas de producción locales: el caso del maíz en Santa Ana Xalmimilulco, Puebla*. Colegio de Postgraduados. Online: <https://bit.ly/3c8sL9z>.
- Turrent, A. (2019). «Agronomía vs Agroecología». Consulta: 25 octubre 2019. Online: <https://bit.ly/3pbP3fV>.
- Turrent, A. y col. (2017). «MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México?» En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 8.5, 1169-1185. Online: <https://bit.ly/3wKy9aT>.
- Velázquez, J. y col. (2019). «Adopción de tecnología agrícola y su influencia en la productividad y competitividad del maíz en el centro-oriente del estado de Puebla, México». En: *Revista de Geografía Agrícola* 63, 101-119. Online: <https://bit.ly/3i5c5Ua>.



PROPAGACIÓN SEXUAL Y ASEJUAL DE *BROSIMUM* *ALICASTRUM* SWARTZ EN CAMPECHE, MÉXICO

SEXUAL AND ASEJUAL PROPAGATION OF *BROSIMUM* *ALICASTRUM* SWARTZ IN CAMPECHE, MEXICO

Alberto Santillán-Fernández^{*1} , Orlando Valentín Santiago-Santes² , Ezequiel
Espinosa-Grande¹ , Zulema Guadalupe Huicab-Pech³ , Francisco Alfonso
Larqué-Saavedra⁴  y Jaime Bautista-Ortega¹ 

¹Colegio de Postgraduados Campus Campeche. Código Postal 24400, Champotón, Campeche, México.

²Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza. Código Postal 73049, Venustiano Carranza, Puebla, México.

³Investigador independiente. Código Postal 24020, Campeche, Campeche, México.

⁴Unidad de Recursos Naturales. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Código Postal 97205, Mérida, Yucatán, México.

*Autor para correspondencia: asantillanf@conacyt.mx

Manuscrito recibido el 3 de julio de 2020. Aceptado, tras revisión, el 1 de marzo de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

Brosimum alicastrum es una especie arbórea en México con amplio potencial para la alimentación animal y humana, que se distribuye de manera natural con nulo manejo silvícola, por lo que existe poca información sobre los métodos de propagación de la especie. El objetivo de este trabajo fue analizar la producción científica reportada sobre *B. alicastrum* mediante minería de textos para conocer las técnicas que existen sobre su propagación; y evaluar en vivero la calidad de plántulas obtenidas por métodos de propagación sexual y asexual (estacas, acodos e injertos) mediante diseños experimentales. Se encontraron 550 artículos científicos sobre *B. alicastrum*, las disciplinas donde se publicaron fueron: Ecología (44,18%), Botánica (13,27%), Ciencias Forestales (11,27%, de los cuales el 2,54% trabajó propagación en vivero), Zoología (11,09%), Agricultura (9,64%), Antropología (5,45%) y otras (5,10%). Respecto al método de propagación por semilla, la mejor calidad de plántula se asoció con sustratos de baja porosidad (tierra de monte) y con contenedores con diámetros grandes (36 cm). Para el caso de la propagación asexual por acodos, cuando se empleó turba como sustrato se obtuvo 90% de sobrevivencia, y por injerto de enchape lateral se encontró 75% de prendimiento. En virtud de la poca investigación que existe sobre la propagación de la especie se recomienda que la selección de la técnica de propagación esté en función de la finalidad de la plántula. Las técnicas asexuales de injerto y acodo pueden ser más eficientes en caso de requerir acortar los ciclos de producción de la semilla de *B. alicastrum*.

Palabras clave: Ramón, silvicultura, vivero forestal, injerto, enraizamiento de estacas, acodo aéreo

Abstract

Brosimum alicastrum is a tree species in Mexico with wide potential for animal and human food, which is distributed naturally with no silvicultural management, so there is little information on the propagation methods of the species. The objective of this work was to analyze the scientific research published on *B. alicastrum*, through literature review to know the techniques that exist on its propagation. In addition, the quality of the seedling obtained by sexual propagation and asexual methods (cuttings, layers and grafts) was evaluated in the nursery, by means of experimental designs. 550 scientific articles on *B. alicastrum* were found, the disciplines where they were published were: Ecology (44.18%), Botany (13.27%), Forest Sciences (11.27%, of which 2.54% worked propagation in the nursery), Zoology (11.09%), Agriculture (9.64%), Anthropology (5.45%) and others (5.10%). Regarding the seed propagation method, the best seedling quality was associated with low porosity substrates (bush soil) and containers with large diameters (36 cm). In the case of asexual propagation, with the layering method when peat was used as the substrate 90% survival was obtained, and by lateral grafting technique 75% yield was found. Due to the little research that exists on the propagation of the species, it is recommended that the selection of the propagation technique is based on the purpose of the seedling; if it is required to shorten the seed production cycles of *B. alicastrum* the asexual techniques grafting and layering can be more efficient.

Keywords: Ramon, forestry, forest nursery, graft, rooting of cuttings, air layering.

Forma sugerida de citar: Santillán, A., Santiago, O., Espinosa, E., Huicab, Z., Larqué, F. y Bautista, J. (2021). Propagación sexual y asexual de *Brosimum alicastrum* Swartz en Campeche, México. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 34(2):105-116. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.07>.

IDs Orcid:

Alberto Santillán-Fernández: <https://orcid.org/0000-0001-9465-1979>
Orlando Valentín Santiago-Santes: <https://orcid.org/0000-0003-2703-3737>
Ezequiel Espinosa-Grande: <https://orcid.org/0000-0003-2181-1876>
Zulema Guadalupe Huicab-Pech: <https://orcid.org/0000-0003-1648-5172>
Francisco Alfonso Larqué-Saavedra: <https://orcid.org/0000-0001-9462-5682>
Jaime Bautista-Ortega: <https://orcid.org/0000-0002-3763-8986>

1 Introducción

Brosimum alicastrum Swartz, conocido comúnmente como Ramón, es un árbol originario de Mesoamérica y el Caribe con amplia distribución en México (Peters y Pardo, 1982). Es apreciado por poseer follaje con alto contenido nutritivo, principalmente para el ganado vacuno y caprino y también por su disponibilidad durante la época de sequía (Hernández, Vergara y Larqué, 2014; Rojas y col., 2017). Ramón representa un elemento ecológicamente importante en la composición florística de las selvas baja y mediana del sur de México (Gutiérrez y Dirzo, 2009).

Ramón tiene la capacidad de producir cuatro veces más alimento y 10 veces más proteína por hectárea que el maíz, sin causar daños al ambiente; además, su semilla, follaje, látex y madera tienen un alto potencial económico, tanto para la alimentación (animal y humana) como para usos medicinales y culturales (Ramírez y col., 2017; Domínguez y col., 2019). Sin embargo, aun con toda esta importancia, en la actualidad la especie se distribuye mayormente de manera natural, con prácticamente nulo manejo silvícola (Vergara y col., 2014).

En el establecimiento de plantaciones se requieren árboles con características fenotípicas y genotípicas sobresalientes, por lo que el método de propagación para la obtención del germoplasma es clave para un buen manejo silvícola (Hernández, Vergara y Larqué, 2015). La propagación puede ser de manera sexual o asexual (Molina y col., 2015).

En la reproducción sexual de los árboles, los progenitores pueden heredar características deseables como indeseables (Molina y col., 2015); mientras que en la propagación vegetativa se puede obtener germoplasma con información genética y rasgos de importancia económica en períodos más cortos, con la desventaja de que se reduce la diversidad genética de la especie por la uniformidad de la descendencia (Bailey, Bímová y Mandák, 2009). En ambos casos el manejo en vivero se refleja en la calidad de la plántula producida, a través de sus características morfológicas y de su capacidad de adaptación al sitio de plantación (Rueda y col., 2014).

Las técnicas tradicionales de propagación asexual en especies forestales son estacas, acodos e

injertos (Pardo, Verdugo y Hernández, 2002). Con el avance de la biotecnología la propagación *in vitro* se ha vuelto una alternativa para aquellas especies con alto valor comercial y de difícil propagación por técnicas tradicionales (Bailey, Bímová y Mandák, 2009). Sin embargo, la principal limitante de la propagación vegetativa es el bajo porcentaje de multiplicación, por ello es importante ampliar el número de especies a propagar y mejorar la técnica, ya que las plantas reproducidas vegetativamente presentan mejor manejo silvícola (Sampayo y col., 2016).

La investigación sobre técnicas de propagación en la especie *B. alicastrum* es casi nula, y la que existe está reportada en su mayoría en formato de manual, sin ningún rigor científico (Gillespie, Bocanegra y Jimenez, 2004; Molina y col., 2015). Dada la importancia de la especie en la península de Yucatán como un recurso vegetal alternativo para la alimentación animal y humana en el contexto de seguridad alimentaria y cambio climático (Ramírez y col., 2017), toma valor la investigación que se desarrolle en torno al manejo silvícola de la especie (Hernández, Vergara y Larqué, 2015).

Bajo este contexto el objetivo de este trabajo fue analizar la producción científica reportada sobre *Brosimum alicastrum* Swartz, mediante minería de textos para conocer las técnicas que existen sobre su propagación. Además de evaluar en vivero, mediante diseños experimentales, la calidad de plántulas obtenidas por métodos de propagación sexual y asexual (estacas, acodos e injertos).

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El trabajo se realizó en el vivero experimental ubicado en las instalaciones del Colegio de Postgraduados campus Campeche (Champotón, Campeche). El material vegetativo de *B. alicastrum* fue recolectado en diferentes localidades aledañas al centro de investigación (Figura 1). La región se caracteriza por una cobertura de selva media subperenifolia y selva alta perenifolia, con suelos arcillosos y precipitaciones de 600 a 4000 mm, con épocas de estiaje de tres a siete meses, temperatura media anual de 18 °C a 27 °C y altitudes de 20 a 1000 msnm. Las principales actividades económicas de esta región son

la ganadería y el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), chihua (*Cucurbita argyrosperma* H.) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (White y Hood, 2004). Destaca que en el periodo de estiaje el principal alimento para el ganado es el árbol Ramón (Góngora y col., 2016).

2.2 Minería de textos y análisis bibliométrico

Para conocer las técnicas que existen sobre la propagación de *B. alicastrum* se consideraron los artículos científicos sobre la especie disponibles en las principales casas editoriales (Elsevier, Springer y Scopus) y sitios web (Latindex, Scielo, Redalyc, Thomson-Reuters, Periodica, Doaj, Google Scholar y Conricyt). La palabra clave utilizada en la búsqueda fue *Brosimum alicastrum*, identificándola en los títulos y palabras clave de las publicaciones.

Las variables que se analizaron de cada artículo fueron: año para conocer la temporalidad de las investigaciones, disciplina de estudio para determinar el área de conocimiento donde más investigación se ha desarrollado, y autores para conocer la red de actores involucrados en la investigación. La información se sistematizó en una hoja de cálculo. Con ayuda del complemento RcmdrPlugin.temis del software estadístico R (Bouchet y Bastin, 2013) se obtuvo la temporalidad de las investigaciones y la frecuencia de las publicaciones por disciplina de estudio.

Con el software Sci2tool (Börner, 2011) se estableció la red de autores. A los autores con más publicaciones en la red se les asoció el área de conocimiento donde han desarrollado sus investigaciones. La sintaxis empleada en el software Sci2tool fue *Extract bipartite Network*, para su visualización se recurrió al software Gephi (Jacomy y col., 2014).

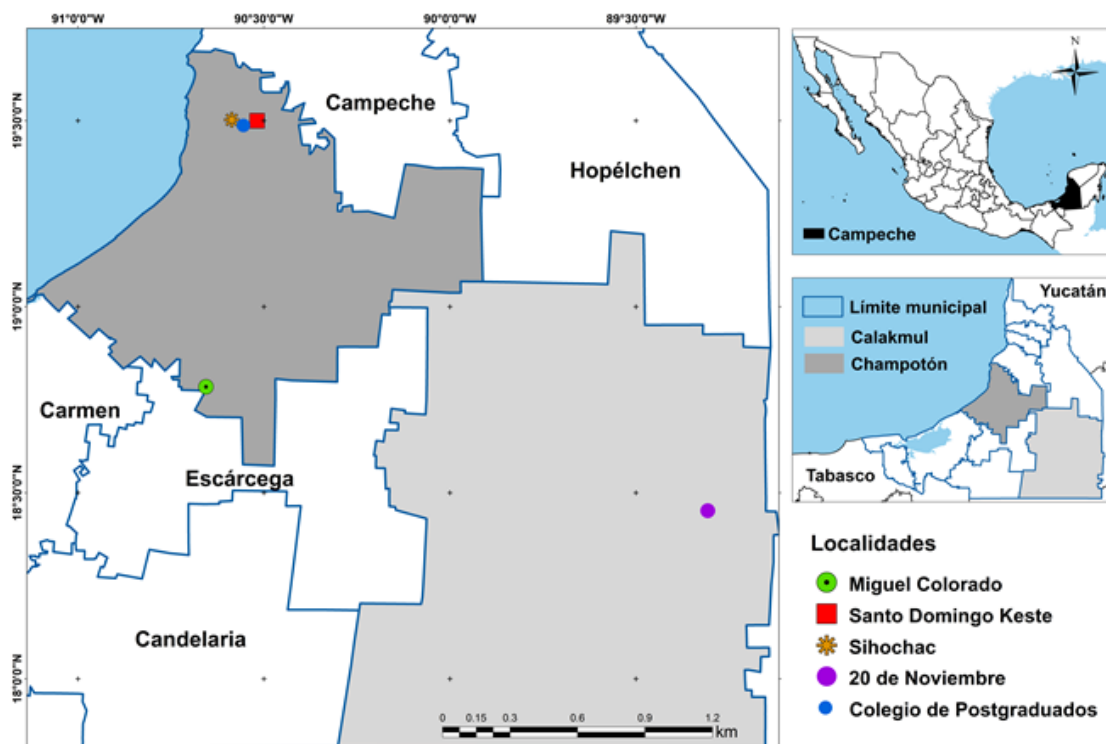


Figura 1. Ubicación espacial de las localidades donde se recolectó el material vegetativo y donde se realizaron los experimentos para evaluar la propagación de *Brosimum alicastrum* Swartz en Campeche, México.

2.3 Propagación sexual

En marzo de 2019 se recolectó semilla de Ramón en la localidad 20 de noviembre (Calakmul, Campeche). Para la recolecta de semilla se siguió la metodología descrita por Vallejos y col. (2010), y se seleccionaron los árboles con las mejores características fenotípicas (dasométricas) con una distancia mínima entre árboles seleccionados de 100 m. El germoplasma se almacenó en bolsas esterilizadas de plástico que fueron trasladadas a las instalaciones del Colegio de Postgraduados, campus Campeche (Champotón, Campeche), México. Las semillas fueron sometidas a un análisis de pureza y una prueba de viabilidad con cloruro de tetrazolio® al 0,5%, conforme la metodología descrita por Orantes y col. (2013). Se evaluó en un vivero forestal rustico de abril a junio de 2020, donde se estableció un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial. Los factores analizados fueron: 1) tipo de contenedor: tubetes (36 y 21 cm de diámetro) y bolsa de plástico (36 y 21 cm de diámetro), y 2) sustrato: (peat moss 50% + agrolita 25% + perlita 25%) y (tierra de monte 60% + lumbricompost 40%).

La mezcla (peat moss 50% + agrolita 25% + perlita 25%) se caracterizó por un pH ligeramente ácido con alta porosidad y capacidad de retención de humedad; mientras que la mezcla (tierra de monte 60% + lumbricompost 40%) presentó un pH neutro con baja porosidad y alta capacidad de retención de agua (Pérez de la Cruz y col., 2012). Para los ocho tratamientos, se aplicó un riego manual cada tres días a las unidades experimentales, conforme la retención de humedad de los sustratos utilizados (Del Amo y col., 2002).

A los 30 días de establecido el diseño experimental, se evaluó el porcentaje de germinación por tratamiento. Con un análisis de varianza y pruebas de medias por Tukey ($\alpha = 0,05$) se establecieron las diferencias estadísticas por tratamiento a los tres meses de establecido el experimento para las variables: altura (cm), número de hojas, diámetro de tallo (cm), biomasa seca del tallo (kg), ancho de la raíz (cm), largo de la raíz (cm) y biomasa seca de la raíz (kg). La biomasa seca de la raíz y tallo se obtuvo en una balanza analítica después de extraer el material vegetativo de una estufa con circulación de aire forzado a 70 °C durante 24 horas.

2.4 Propagación asexual

Se probaron tres técnicas de propagación asexual: estacas, acodos e injertos. Para el caso de las estacas, el material vegetal se recolectó en marzo de 2019 en la comunidad Miguel Colorado (Champotón, Campeche). Mediante un recorrido en campo se seleccionaron árboles sanos, vigorosos, libres de plagas, con frutos en el momento de la recolecta, y rectos sin bifurcación. El material vegetal fue envuelto en papel periódico húmedo para evitar que se deshidratara durante su traslado al vivero del Colegio de Postgraduados, campus Campeche.

Las estacas fueron colocadas en bolsas de polietileno con sustrato tradicional de vivero (peat moss 50%, agrolita 25% y perlita 25%). Se evaluaron brotes y raíces en las estacas a los tres meses (abril-junio) mediante un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial. Los factores considerados fueron: tipo de enraizador (Auxina, Fortimax, Raidzone Plus y Magic Plus), y posición de estaca (basal, intermedia y apical). Para los 12 tratamientos se aplicó un riego manual cada tres días a las unidades experimentales. Las variables analizadas fueron número y longitud (cm) de los brotes aéreos, y biomasa seca y fresca de raíces y tallos (kg), altura vertical (cm) y horizontal (cm) de la raíz.

En mayo de 2019 se desarrolló el experimento de propagación *in vivo* por acodos a árboles jóvenes de Ramón (menos de 5 años) en la localidad de Sihochac (Champotón, Campeche). Mediante un recorrido en campo, se seleccionaron árboles sanos, vigorosos, libres de plagas y rectos sin bifurcación. Se consideró un diseño experimental completamente al azar con tres tratamientos (T) y 30 repeticiones por tratamiento: T1 (Auxina + Turba), T2 (Auxina + Vermiculita) y T3 (Auxina + Perlita). Las variables analizadas fueron: porcentaje de sobrevivencia a los tres meses, y número, longitud (cm) y biomasa seca (kg) de las raíces.

En julio de 2019 en la localidad de Santo Domingo Keste (Champotón, Campeche) se llevó a cabo el experimento de propagación *in vivo* por injerto a árboles jóvenes de Ramón menores a un año, con material vegetativo de árboles de la misma especie no menores a cinco años y con capacidad de producir frutos. Para la selección de los árboles patrón y de donde se obtuvieron las varetas a injertar,

se seleccionaron árboles sanos, vigorosos, libres de plagas y rectos sin bifurcación.

Las técnicas de injerto utilizadas fueron: hendidura, yema, enchape lateral e inglés simple. Se estableció un diseño experimental completamente al azar, donde se tomó a cada técnica de injerto como un tratamiento con 20 repeticiones por tratamiento. Las variables analizadas fueron porcentaje de prendimiento a los tres meses. Además de altura (cm), diámetro (cm), número de hojas y número de brotes del material vegetativo injertado. Para establecer las diferencias estadísticas por tratamientos y variables analizadas, se efectuó un análisis de varianza y pruebas de medias por Tukey ($\alpha = 0,05$) tanto para el método de propagación por estacas como para acodos e injertos.

3 Resultados y Discusión

3.1 Minería de textos y análisis bibliométrico

De 1970 a 2019 se publicaron 550 artículos científicos donde la especie *B. alicastrum* apareció en el

título o palabras clave. De acuerdo con De Granda y col. (2005) en el título se indica la temática precisa del trabajo y las palabras clave permiten ubicar en cualquier índice el tema tratado en el artículo. Las disciplinas que publicaron temas relacionados con la especie *B. alicastrum* fueron: Ecología (44,18%), Botánica (13,27%), Ciencias Forestales (11,27%, de los cuales el 2,54% trabajó propagación en vivero), Zoología (11,09%), Agricultura (9,64%), Antropología (5,45%) y otras (5,10%).

En la Figura 2 se observa la red de autores de los 550 trabajos analizados. Se destacaron los autores con el mayor número de contribuciones por área de conocimiento. Ecología resultó ser la disciplina donde mayor investigación se ha desarrollado. Este aspecto ha sido reportado por Vergara y col. (2014) quienes coincidieron que para Ramón existe poca investigación sobre el manejo silvícola de la especie. Lo que constituye un área de oportunidad para el desarrollo de investigación, ya que de acuerdo con Ramírez y col. (2017) la especie tiene amplio potencial para la agroindustria de alimentos pecuarios, sobre todo en los sectores: porcino, bovino, ovino, avícola y acuícola en el marco de la seguridad alimentaria y cambio climático.

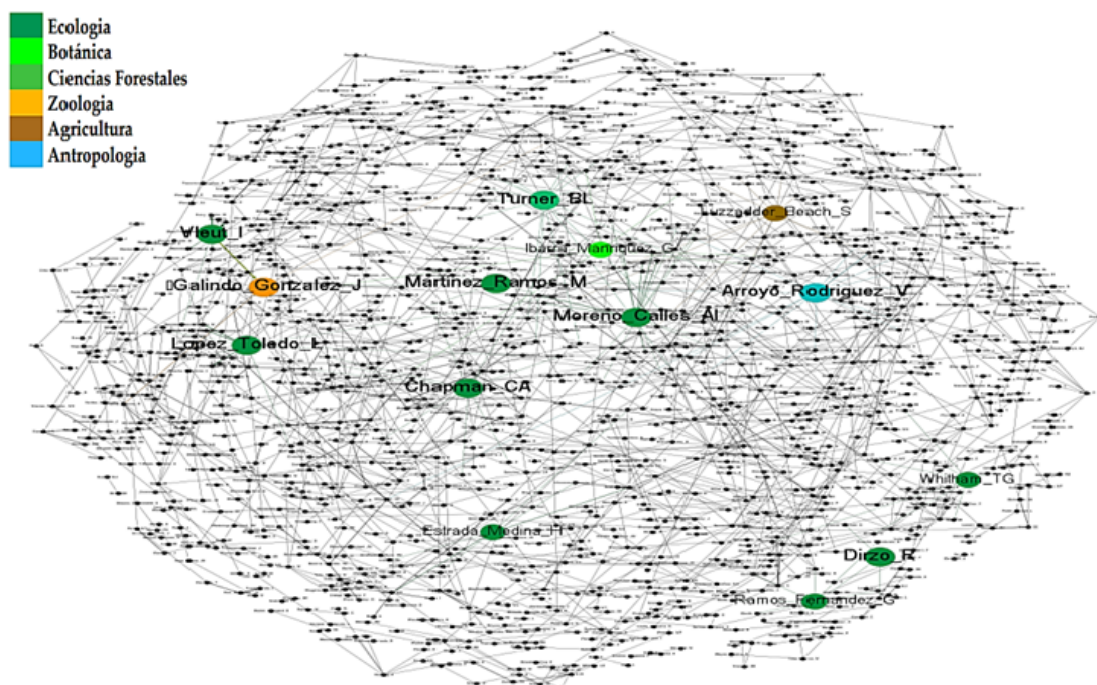


Figura 2. Red de autores de las disciplinas donde se ha desarrollado más investigación sobre *Brosimum alicastrum* Swartz.

Hernández, Vergara y Larqué (2014) destacaron la importancia que las plantaciones con Ramón en el sureste mexicano tendrían para la agroindustria de alimentos pecuarios, al garantizar la materia prima de sus operaciones. De acuerdo con Vergara y col. (2014) el nulo manejo silvícola de la especie se comprende porque la industria en torno a *B. alicastrum* es emergente y la investigación actual se centra en evaluar sus propiedades y usos potenciales.

3.2 Propagación Sexual

Para la prueba de pureza, se analizaron 858 semillas de *B. alicastrum* con una biomasa total de 2128 g. El 91 % de las semillas (785; 1944 g) resultó no estar rota, vana, manchada y sin rastro de ataque de insectos (orificios y/o larvas). Sin embargo, el alto porcentaje de pureza contrastó con la viabilidad (potencial de germinación) de la semilla. Los resultados del contacto directo de las semillas con la solución de Tetrazolio® a temperatura ambiente y con luz limitada durante 24 horas arrojó en promedio para las cuatro repeticiones con 10 semillas por repetición, una viabilidad alta en un 20 % de las semillas, media (27,5 %) y baja (52,5 %).

El bajo potencial de germinación de las semillas de *B. alicastrum* ha sido documentado por Gillespie, Bocanegra y Jimenez (2004) con valores inferiores al 50 %, lo que coincidió con los resultados obtenidos en esta investigación, pero contrastaron con lo reportado por Del Amo y col. (2002) con porcentajes de germinación superiores al 75 %. Estas diferencias se explicaron debido a que las semillas de Ramón son recalcitrantes (García, Roque y Méndez, 2012; Loría y Larqué, 20015), propiedad que las hace más sensibles a la deshidratación y rápida pérdida de viabilidad, lo que limita su almacenamiento con fines de propagación (Magnitskiy y Plaza, 2007).

La evaluación de la germinación a los 30 días post-siembra resultó en un 59,6 %, lo que coincidió con la baja viabilidad de la semilla obtenida en la prueba de Tetrazolio® (Tabla 1). Sin embargo, difirió con lo reportado por Laborde y Corrales (2012) quienes encontraron un 75 % de germinación cuando las semillas cayeron directamente del árbol al suelo. De acuerdo con Del Amo y col. (2002) el porcentaje de germinación de las semillas de *B. alicastrum* en vivero estuvo directamente relacionado

con la temporalidad recolecta-siembra, por la propiedad recalcitrante de la semilla.

En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis de varianza y prueba de medias por Tukey ($\alpha = 0,05$) por tratamiento y variables evaluadas. Se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos utilizados ($P < 0,0001$). La prueba de rangos múltiples de Tukey indicó que el tratamiento 6 (bolsa de 36 cm de diámetro con sustrato 2: tierra de monte 60 % + lumbricompost 40 %) fue el que presentó los mayores valores para las características fenotípicas evaluadas.

El tipo de contenedor (tubete o bolsa de plástico) no mostró diferencias estadísticas. Este resultado coincidió con lo reportado por Luna, Landis y Dumroese (2012) quienes encontraron que el uso de bolsas de plástico como contenedor en vivero ocurre por términos económicos. El factor que si resultó estadísticamente significativo fue el tamaño del diámetro del contenedor. Los mayores valores para las características fenotípicas evaluadas se presentaron en aquellos contenedores de mayor diámetro (36 cm).

Este resultado contrastó con lo reportado por Pérez de la Cruz y col. (2012) quienes encontraron que en el primer mes en vivero las semillas de *B. alicastrum* presentaron un crecimiento más rápido en contenedores con diámetros de 21 cm. Sin embargo, de acuerdo con Luna, Landis y Dumroese (2012) los contenedores de mayor diámetro otorgaron mejores características en vivero a las especies de hojas grandes, por el espacio entre plantas, que les permitió aprovechar mejor la luz, calor, agua y nutrientes.

3.3 Propagación Asexual

La propagación por estacas no fue significativa, pues las unidades experimentales evaluadas en los diferentes tratamientos no lograron sobrevivir. Ninguna unidad experimental logró formación de raíces, y solo 7 de 240 presentaron brotes aéreos (Tabla 2). Sampayo y col. (2016) encontraron que fue común la presencia de brotes aéreos en especies forestales propagadas por estacas. Sin embargo, el éxito de esta técnica se midió por el porcentaje de enraizamiento logrado (Peralta y col., 2017).

Tabla 1. Variables fenotípicas en vivero de plántulas de *Brosimum alicastrum* Swartz propagadas mediante semilla.

Tratamiento*	Repeticiones		Altura (cm)	Hojas	Tallo		Raíz		
	Total	% Germinación			Diámetro (cm)	Biomasa (kg)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Biomasa (kg)
T1 (T36+S1)	30	73,33 (22)	26,75 AB	5,77 AB	3,58 AB	0,76 B	10,60 A	12,67 AB	0,65 AB
T2 (T36+S2)	30	80,00 (24)	25,90 BC	6,08 AB	3,37 B	0,54 BCD	12,10 A	12,40 ABC	0,51 BCD
T3 (T21+S1)	30	50,00 (15)	25,70 BC	5,35 BC	3,20 BC	0,54 BCD	4,87 B	10,35 BC	0,39 CDE
T4 (T21+S2)	30	63,33 (19)	19,10 D	3,13 D	2,47 C	0,28 D	2,78 B	9,97 CD	0,24 E
T5 (B36+S1)	30	60,00 (18)	28,35 AB	5,91 AB	3,47 AB	0,66 BC	9,91 A	10,30 BC	0,530 BC
T6 (B36+S2)	30	73,33 (22)	32,50 A	6,96 A	4,18 A	1,18 A	9,56 A	14,17 A	0,83 A
T7 (B21+S1)	30	40,00 (12)	23,71 BC	5,00 BC	3,06 BC	0,43 CD	4,50 B	7,50 DE	0,31 CDE
T8 (B21+S2)	30	36,67 (11)	20,13 CD	4,06 CD	2,49 C	0,31 D	4,69 B	7,22 E	0,28 DE
Total	240	59,58 (143)							

* T36: Tubete 36 cm; T21: Tubete 21 cm; B36: Bolsa 36 cm; B21: Bolsa 21 cm; S1: peat moss 50 % + agrolita 25 % + perlita 25 %; S2: tierra de monte 60 % + lumbricompost 40 %. Medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0,05$).

Respecto al tipo de sustrato, el Sustrato 2 (tierra de monte 60 % + lumbricompost 40 %), fue ligeramente superior al Sustrato 1 (peat moss 50 % + agrolita 25 % + perlita 25 %). Este resultado estuvo de acuerdo con lo reportado por Laborde y Corrales (2012), Pérez de la Cruz y col. (2012) y Hernández, Vergara y Larqué (2015) quienes coincidieron que *B. alicastrum* se desarrolló mejor en sustratos locales con características físicoquímicas similares a las áreas donde se distribuyó de manera natural, que en sustratos comerciales de uso común en vivero.

De acuerdo con González y col. (2019) en la propagación asexual por estacas de especies forestales, la obtención de resultados no significativos pudo ser producto de un inadecuado manejo en vivero, al tejido lignificado del material vegetal e incluso a la fecha de recolecta. No obstante, los resultados coincidieron con lo reportado por Vergara y col. (2014) y Molina y col. (2015) quienes postularon que la propagación por estacas para *B. alicastrum* fue una técnica no viable debido al tejido lignificado de la especie.

Los métodos de acodo e injerto si resultaron significativos y la prueba de medias por Tukey estableció diferencias estadísticas entre los tratamientos con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$). Para el caso de acodos, el tratamiento con sustrato de turba presentó los mayores resultados (Tabla 3). En

el caso de injerto, la técnica de enchape lateral fue la que resultó significativa con un prendimiento del 75 % (15 de 20 repeticiones), superior al de hendidura (20,00%; cuatro de 20 repeticiones), yema (0,00%; cero de 20 repeticiones) e inglés simple (10,00%; dos de 20 repeticiones) (Tabla 4).

Molina y col. (2015) encontró en regiones de El Salvador que para la especie *B. alicastrum* el injerto constituyó la forma más viable de propagación asexual. Sin embargo, a diferencia de este estudio, no se consideraron tratamientos previos con hormonas de crecimiento a los materiales vegetativos injertados en esta investigación. En ambos estudios la técnica de enchape lateral fue la que mayor porcentaje de prendimiento logró: 75 % en esta investigación y 42 % para Molina y col. (2015).

Tabla 2. Variables fenotípicas del material vegetativo de *Brosimum alicastrum* propagado asexualmente mediante la técnica de estacas.

Tratamiento	Repeticiones		Brotes aéreos		Raíz (Longitud: cm)		
	Total	Significativas	Número	Longitud (cm)	Biomasa	Vertical	Horizontal
T1 (AU_BA)	30	2	3	0,5	0	0	0
T2 (AU_IN)	30	2	2	0,25	0	0	0
T3 (AU_AP)	30	2	3	3,93	0	0	0
T5 (FO_IN)	30	1	1	2,35	0	0	0
Otros **	240	0	0	0	0	0	0

Enraizador: Auxina (AU), Fortimax (FO), Raidzone Plus (RP), Magic Plus (MP). Posición de estaca: Basal (BA), Intermedia (IN), Apical (AP). **T4 (FO_BA), T6 (FO_AP), T7 (RP_BA), T8 (RP_IN), T9 (RP_AP), T10 (MP_BA), T11 (MP_IN), T12 (MP_AP).

Tabla 3. Variables fenotípicas del material vegetativo de *Brosimum alicastrum* Swartz propagado asexualmente mediante la técnica de acodos.

Tratamiento	Repeticiones		Número	Raíz	
	Total	% Supervivencia		Longitud (cm)	Biomasa (kg)
T1 (Turba)	30	90 (27) A	13,56 A	11,99 A	0,61 A
T2 (Vermiculita)	30	80 (24) B	12,44 AB	8,55 B	0,52 AB
T3 (Perlita)	30	80 (24) B	10,78 B	9,05 B	0,31 B

El enraizador utilizado para todos los tratamientos fue Auxina. Medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0,05$). El % de Supervivencia se calculó por tratamiento, entre paréntesis se indica el número de repeticiones que sobrevivieron del total por tratamiento.

Tabla 4. Variables fenotípicas del material vegetativo de *Brosimum alicastrum* Swartz propagado asexualmente mediante la técnica de injerto.

Tipo de injerto	Repeticiones		Material vegetativo injertado			
	Total	% Prendimiento	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Hojas (número)	Brotes (número)
Hendidura	20	20,00 (4) B	8,75 AB	0,11 B	8,72 B	1,25 B
Yema	20	0,00 (0) C	0,00 C	0,00 C	0,00 D	0,00 C
Enchape lateral	20	75,00 (15) A	10,35 A	0,139 A	15,59 A	2,63 A
Inglés simple	20	10,00 (2) B	5,54 B	0,06 C	5,28 C	0,74 B

Medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0,05$). El % de Prendimiento se calculó por tipo de injerto, entre paréntesis se indica el número de repeticiones que presentaron prendimiento del total por tipo de injerto.

La diferencia en los porcentajes de prendimiento pudo explicarse por la condición juvenil de los materiales vegetativos empleados (5 años, con esquejes tiernos no lignificados) y patrón (1 año). De acuerdo con Alba y col. (2017) el porcentaje de prendimiento del material vegetativo injertado estuvo asociado al carácter juvenil de los materiales, por lo que cuanto más joven el individuo, más rápido y fácil su propagación. Lo que convierte al injerto en el método de propagación asexual más eficaz (Bailey, Bímová y Mandák, 2009).

Para el caso de la técnica de propagación por acodos, no se encontraron trabajos donde se reporte el empleo de esta técnica en la propagación asexual de *B. alicastrum*. De acuerdo con Vergara y col. (2014) el nulo manejo silvícola que presenta la especie, ha limitado el desarrollo de la investigación sobre sus formas de propagación.

4 Conclusiones

La producción científica encontrada sobre *B. alicastrum* se centró en analizar y describir aspectos de ecología y botánica de la especie; los trabajos sobre su propagación fueron escasos. Por lo que el desarrollo de investigación en torno a este tema es un área prioritaria para contribuir al manejo silvícola de la especie.

En el método de propagación por semilla, el porcentaje de germinación en vivero estuvo asociado con sustratos de pH neutro y baja porosidad, y la calidad de plántulas a contenedores con diámetros grandes (36 cm). La propagación asexual por estacas no fue factible; los mejores resultados

se obtuvieron con el método acodos con un 90 % de sobrevivencia, e injerto con la técnica enchape lateral con un 75 % de prendimiento.

En virtud de la poca investigación que existe sobre la propagación de la especie, se recomienda que la selección de la técnica de propagación esté en función de la finalidad de la plántula, y si se requieren acortar los ciclos de producción de semilla de *B. alicastrum* las técnicas asexuales injerto y acodo pueden ser más eficientes.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de la Catedra-Conacyt 364 titulada: Reconversión productiva sustentable para el desarrollo de los productores rurales de Campeche. Se agradece a las autoridades del Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza por las facilidades brindadas para la defensa de tesis de la Licenciatura en Ingeniería Forestal del segundo autor.

Referencias

- Alba, J. y col. (2017). «Injertos de fenotipos selectos de *Pinus greggii* engelm. de una prueba genética en Villa Aldama, Veracruz, México». En: *Foresta Veracruzana* 19.2, 57-61. Online: <https://bit.ly/3lokErO>.
- Bailey, J., K. Bímová y B. Mandák (2009). «Asexual spread versus sexual reproduction and evolution in *Japanese Knotweed* s.l. sets the stage for the "Battle of the Clones"». En: *Biological Inva-*

- sions 11.5, 1189-1203. Online: <https://bit.ly/33Cgd6v>.
- Börner, Katy (2011). «Science of Science Studies: Sci2 Tool». En: *Communications of the ACM* 54.3, 60-69. Online: <https://bit.ly/2S2A7ED>.
- Bouchet, M. y G. Bastin (2013). «RcmdrPlugin.temis, a graphical integrated text mining solution in R». En: *The R Journal* 5.1, 188-196. Online: <https://bit.ly/3iDUUFW>.
- De Granda, J. y col. (2005). «Las palabras clave como herramientas imprescindibles en las búsquedas bibliográficas. Análisis de las áreas del sistema respiratorio a través de Archivos de Bronconeumología». En: *Archivos de Bronconeumología* 41.2, 78-83. Online: <https://bit.ly/3f399o9>.
- Del Amo, S. y col. (2002). *Germinación y manejo de especies forestales tropicales*. CONAFOR-CONACYT. Online: <https://bit.ly/3y2cxbE>.
- Domínguez, P. y col. (2019). «Textura, color y aceptación sensorial de tortillas y pan producidos con harina de ramón (*Brosimum alicastrum*) para incrementar la fibra dietética total». En: *Ciencia & Tecnología Agropecuaria* 20.3, 699-719. Online: <https://bit.ly/3uCGiCc>.
- García, C., A. Roque y M. Méndez (2012). «Aprovechamiento del árbol nativo *Brosimum alicastrum* Swartz (Moraceae) en la Selva Zoque Chiapas, México». En: *LACANDONIA* 6.1, págs. 71-76.
- Gillespie, A., D. Bocanegra y J. Jimenez (2004). «The propagation of Ramon (*Brosimum alicastrum* Sw.; Moraceae) in Mayan homegardens of the Yucatan peninsula of Mexico». En: *New Forests* 27.1, 25-38. Online: <https://bit.ly/3bhlvaW>.
- Góngora, R. y col. (2016). «Uso tradicional de la flora y fauna en los huertos familiares mayas en el municipio de Campeche, Campeche, México». En: *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 3.9, 379-389. Online: <https://bit.ly/3wfYuxf>.
- González, A. y col. (2019). «Propagation by cuttings and plant quality in *Acer negundo* L.» En: *Revista mexicana de ciencias forestales* 10.51, 224-243. Online: <https://bit.ly/3y9iSC6>.
- Gutiérrez, G. y R. Dirzo (2009). «Remoción de semillas, herbivoría y reclutamiento de plántulas de *Brosimum alicastrum* (Moraceae) en sitios con manejo forestal contrastante de la selva maya, Quintana Roo, México». En: *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 85, 51-58. Online: <https://bit.ly/3ylbJ1y>.
- Hernández, O., S. Vergara y A. Larqué (2014). «Studies on the productivity of *Brosimum alicastrum* a tropical tree used for animal feed in the Yucatan Peninsula». En: *Bothalia J. Botanical Life Sci. Res* 44.6, 70-81. Online: <https://bit.ly/3hewXbm>.
- (2015). «Primeras etapas de crecimiento de *Brosimum alicastrum* Sw. en Yucatán». En: *Revista mexicana de ciencias forestales* 6.27, 38-49. Online: <https://bit.ly/3bBZHXP>.
- Jacomy, M. y col. (2014). «ForceAtlas2, a continuous graph layout algorithm for handy network visualization designed for the Gephi software». En: *PloS one* 9.6, e98679. Online: <https://bit.ly/36DghVD>.
- Laborde, J. e I. Corrales (2012). «Direct seeding of *Brosimum alicastrum* Sw. (Moraceae) and *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (Mimosaceae) in different habitats in the dry tropics of central Veracruz». En: *Acta botánica mexicana* 100, 107-134. Online: <https://bit.ly/3tYx0ur>.
- Loría, L. y A. Larqué (20015). «The effect of salicylic acid on the growth of seedling roots of *Brosimum alicastrum*, a perennial tree from the Mexican tropics which produces recalcitrant seeds». En: *Sylwan* 158.6, 338-346. Online: <https://bit.ly/3hfGPBA>.
- Luna, T., T. Landis y R. Dumroese (2012). «Producción de plantas en viveros forestales». En: Consejo Federal de Inversiones, Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico, y Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Cap. Contenedores: aspectos técnicos, biológicos y económicos, 78-85. Online: <https://bit.ly/3uz9SUA>.
- Magnitskiy, S. y G. Plaza (2007). «Fisiología de semillas recalcitrantes de árboles tropicales». En: *Agronomía colombiana* 25.1, 96-103. Online: <https://bit.ly/3hdKxf9>.
- Molina, M. y col. (2015). «Caracterización morfológica in situ de Ojushte (*Brosimum alicastrum* Swartz) y su incidencia en la selección de germoplasma de alto potencial nutricional en El Salvador». En: *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible* 3, 61-76. Online: <https://bit.ly/3f7TpAg>.
- Orantes, C. y col. (2013). «Viabilidad y germinación de semillas de tres especies arbóreas nativas de la selva tropical, Chiapas, México». En: *Polibotánica* 36, 117-127. Online: <https://bit.ly/3tSxWkd>.
- Pardo, D., F. Verdugo y J. Hernández (2002). «Reproducción vegetativa de dos especies arbóreas

- en un manglar de la costa norte del Pacífico mexicano». En: *Madera y Bosques* 8.2, 57-71. Online: <https://bit.ly/3bhu0mm>.
- Peralta, M. y col. (2017). «Reguladores del crecimiento y sustratos en la propagación vegetativa de Nanche (*Malpighia mexicana* A. Juss. y *Byrsosima crassifolia* (L) HBK)». En: *Revista Brasileira de Fruticultura* 39.3, 1-9. Online: <https://bit.ly/33QkJhc>.
- Pérez de la Cruz, S. y col. (2012). «Diferencias en crecimiento y desarrollo de plántulas de mojú (*Brosimum alicastrum* Swartz) en condiciones de vivero». En: *LACANDONIA* 6.2, págs. 51-57.
- Peters, C. y E. Pardo (1982). «*Brosimum alicastrum* (Moraceae): uses and potential in Mexico». En: *Economic Botany* 36.2, 166-175. Online: <https://bit.ly/3o1F4cA>.
- Ramírez, S. y col. (2017). «El ramón (*Brosimum alicastrum* Swartz) una alternativa para la seguridad alimentaria en México». En: *Agroproductividad* 10.1, 80-83. Online: <https://bit.ly/33v94Ec>.
- Rojas, J. y col. (2017). «Utilización del follaje de ramón (*Brosimum alicastrum* Swarth) en la alimentación animal». En: *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 20.3, 363-371. Online: <https://bit.ly/3vT7nMZ>.
- Rueda, A. y col. (2014). «Calidad de planta producida en los viveros forestales de Nayarit». En: *Revista mexicana de ciencias forestales* 5.22, 58-73. Online: <https://bit.ly/33SpJSe>.
- Sampayo, S. y col. (2016). «Enraizado de miniestacas de *Cedrela odorata* L.» En: *Agrociencia* 50.7, 919-929. Online: <https://bit.ly/3bAlkqo>.
- Vallejos, J. y col. (2010). «Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal». En: *Agronomía Costarricense* 34.1, 105-119. Online: <https://bit.ly/3hyGw55>.
- Vergara, S. y col. (2014). *Publicaciones de Brosimum alicastrum*. Mérida, Yucatán, México: Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán.
- White, D. y C. Hood (2004). «Vegetation patterns and environmental gradients in tropical dry forests of the northern Yucatan Peninsula». En: *Journal of Vegetation Science* 15.2, 151-160. Online: <https://bit.ly/3vTkzBI>.



REVISIÓN SOBRE LÍMITES MÁXIMOS DE CADMIO EN CACAO (*THEOBROMA CACAO* L.)

REVIEW ON MAXIMUM LIMITS OF CADMIUM IN COCOA (*Theobroma cacao* L.)

Nelino Florida Rofner*

Carrera profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua. Universidad Nacional Agraria de la Selva-Perú, Av. Universitaria Km 1.5

*Autor para correspondencia: nelinof@hotmail.com

Manuscrito recibido el 30 de octubre de 2020. Aceptado, tras revisión, el 23 de febrero de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

El cadmio (Cd) tiende a bioacumularse en granos de *Theobroma cacao*, afectando la salud humana y sus posibilidades de comercialización. Esto llevó a la Unión Europea (UE) a aprobar el Reglamento N° 488/2014 para productos procesados del cacao, y motivó a la comunidad científica a realizar investigaciones sobre su bioacumulación en granos, los potenciales riesgos a la salud, calidad, y sus posibilidades de exportación. Los resultados evidencian altos niveles en diferentes regiones de los principales países productores Latinoamericanos (LA): Brasil, Ecuador, Colombia, Perú, República Dominicana, Bolivia, Honduras, y otros. Sin embargo, el reglamento 488/2014 no estipula límites máximos en cacao sin procesar; en ausencia de este, las investigaciones han clasificado estos límites, tomando como referencia los límites para cacao procesado, generando sobredimensionamiento de los niveles del metal, controversias en el mercado y retroceso en la sustitución del cultivo ilegal de la coca en esta región. Por lo tanto, en este artículo de revisión se detallarán las investigaciones realizadas sobre los niveles de Cd en granos de cacao en principales países productores de América Latina, la aplicación del reglamento N° 488/2014 a cacao sin procesar, las propuestas para establecer límites máximos en granos sin procesar y sus implicaciones en la sustitución de cultivos ilícitos.

Palabras clave: Cacao sin procesar, cacao de América Latina, cadmio en granos, cultivos ilícitos, límites máximos, reglamento.

Abstract

Cadmium (Cd) tends to bioaccumulate in *Theobroma cacao* beans, affecting human health and its marketing possibilities. For this reason, the European Union (EU) approved Regulation No 488/2014 for processed cocoa products, which applies from January 2019, and motivated authors to conduct research on its bioaccumulation in beans, the potential risks to health, quality, and its export possibilities. The results show high levels in different regions of the main Latin

American (LA) producing countries: Brazil, Ecuador, Colombia, Peru, the Dominican Republic, Bolivia, Honduras, and others. However, EU regulation does not stipulate maximum limits for raw cocoa. In the absence of it, research has been classified by reference to the limits for processed cocoa, generating oversized metal levels, controversies in the producer's and setback in replacing illegal coca cultivation in this region. Thus, this review article will detail research on Cd levels in cocoa beans in major Latin American producing countries, the application of EU regulation No 488/2014 to raw cocoa, proposals to set maximum limits on raw beans and their implications for replacing illicit crops.

Keywords: Raw cocoa, Latin American cocoa, beans cadmium, illicit crops, maximum limits, regulations.

Forma sugerida de citar: Florida Rofner, N. (2021). Revisión sobre límites máximos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 34(2):117-130. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>.

ID Orcid:

Nelino Florida Rofner: <http://orcid.org/0000-0002-8751-4367>

1 Introducción

El cadmio (Cd) es un metal pesado con propiedades intermedias entre el zinc (Zn) y el mercurio (Hg) (Pérez y Azcona, 2012; Antoine y col., 2017), ampliamente usado en la industria desde hace 50 años (Pérez y Azcona, 2012; Gunnar, 2013). En la actualidad está provocando una serie de trastornos en la salud, con afecciones en órganos vitales: pulmones, riñones, hueso y probablemente desarrollo de carcinogénesis (Reyes y col., 2016), consecuencia de su alta movilidad y poder bioacumulativo (Reyes y col., 2016; Engbersen y col., 2019; Raju y col., 2020; Gunnar, 2013). Los estudios recientes consideran al cadmio junto con el plomo, mercurio y cromo como elementos muy peligrosos para la alimentación humana (Casteblanco, 2018; Engbersen y col., 2019); situación que ha captado la atención de la comunidad científica orientada a su descripción y comportamiento en los sistemas biológicos a plantear alternativas de prevención, control y remediación.

La implementación del Reglamento N° 488/2014 estableció límites tolerables entre 0,1 a 0,8 $\mu\text{g g}^{-1}$ a productos derivados del cacao (Jiménez, 2015; Kruszewski, Wiesław y Kowalska, 2018), mencionados en los reportes científicos previos que mostraban niveles altos de cadmio en suelos (CdS) y granos (CdA) (Prieto y col., 2009; Mite, Carrillo y Durango, 2010; Sánchez, Rivero y Martínez, 2011; Bravo, Arboleda y Martin, 2014) y, propició una carrera científica orientada al tema. Al respecto, las investigaciones han puesto en evidencia que los suelos generalmente tienen bajos niveles de Cd y su biodisponibilidad depende de las características del suelo (Bravo, Arboleda y Martin, 2014; He y col., 2015; Gramlich y col., 2017; Díaz y col., 2018; Gramlich y col., 2018). También, se reportan concentraciones de CdA superiores al propio suelo, producido por diversos factores entre el sistema suelo-cacao (Chávez y col., 2015; Arévalo y col., 2017b; Gramlich y col., 2017; Hernández y col., 2017; Tantalean y Huauya, 2017; Casteblanco, 2018; Díaz y col., 2018; Florida, Claudio y Gómez, 2018; Gramlich y col., 2018; Kruszewski, Wiesław y Kowalska, 2018; Argüello y col., 2019; Barraza y col., 2019; Florida y col., 2019; Romero y col., 2019; Zug y col., 2019), y en su mayoría reportan valores que superan los límites tolerables establecidos por la UE.

En este contexto, los reportes científicos han tomado como norma de referencia para determinar los niveles de CdA al Reglamento N° 488/2014 (Unión Europea-UE, 2014), que rige desde enero del 2019 (Jiménez, 2015; Kruszewski, Wiesław y Kowalska, 2018; Meter, Atkinson y Laliberte, 2019) y establece límites tolerables entre 0,1 a 0,8 $\mu\text{g g}^{-1}$ a productos derivados del chocolate y no dispone límite máximo para granos sin procesar. Además, existe una clasificación incorrecta al aplicar límites tolerables de productos derivados o procesados a las concentraciones en granos de cacao sin procesar (Pastor, 2017). Por esta razón, debe consignarse o regularse un límite máximo de Cd en granos secos o masa de cacao sin procesar, utilizando algunos criterios y tomando como base lo ya establecido en el actual reglamento de la UE (Meter, Atkinson y Laliberte, 2019). En este contexto, el objetivo de este trabajo de revisión es detallar las investigaciones realizadas sobre los niveles de Cd en cacao de los principales productores en América Latina; analizar la aplicación del actual reglamento de la UE; exponer las propuestas de límites máximos en granos sin procesar y las implicancias del vacío normativo en el productor y en la sustitución de cultivos ilícitos en la región.

2 Metodología

Se realizó una búsqueda en las bases de datos de Scielo, Web of Science y Scopus, enfocándose en el tema del cadmio realizados en los principales países productores de cacao en América Latina como Perú, Colombia, Ecuador, Brasil, Bolivia, Honduras, Venezuela y República Dominicana. La búsqueda se realizó restringiendo los resultados con las palabras clave: cadmio, cadmio en cacao, cadmio en plantas, toxicidad del cadmio y cadmio en la salud.

Se identificó que el tema es tratado principalmente en las revistas: Science of The Total Environment, Water Air Soil Pollution, Ecotoxicology and Environmental Safety, Acta Agronómica y otros como fuentes primarias, y como fuentes secundarias a instituciones como Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Unión Europea (UE), Codex Alimentarius (CODEX), Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y los sectores gubernamentales del Perú: Ministerio de Agricultura y Riego -

MINAGRI y el Instituto de Estadística e Informática - INEI. Posteriormente, se amplió la búsqueda a otras revistas a través de buscadores como Google Scholar, así como congresos organizados por la International Cocoa Organization (ICO). Se seleccionaron las investigaciones de los últimos 10 años, salvo casos particulares de artículos que son citados con mucha frecuencia en el resto de las publicaciones analizadas en esta revisión.

3 Cd en cacao de origen Latino Americano

Antes del 2014 y entre el 2014 al 2019, periodo de adaptación a la entrada en vigencia del reglamento de la UE y posterior a la entrada en vigencia, se han realizados una serie de trabajos (Tabla 1) en los principales productores en LA, a escalas nacionales, regionales y focalizadas en áreas experimentales.

La Tabla 1 muestra los reportes científicos publicados en revistas indexadas y arbitradas, y los países con más reportes científicos son Ecuador y Perú; además, los valores medios más altos reportados lo encabezan Perú, Costa Rica y Venezuela. La clasificación de los niveles de Cd fue realizada según los límites tolerables del Reglamento N° 488/2014 de la UE, que fija un límite tolerable máximo de $0,8 \mu\text{g g}^{-1}$ a chocolates con sólidos de cacao superiores o iguales al 50%; según este criterio, el 70,59% de los reportes corresponden a niveles altos de cadmio y solo 29,4% estarían dentro de los límites exigidos por la UE.

Los resultados mostrados (Tabla 1), independientemente del método de su determinación, fueron clasificados en algunos casos tomando como referencia y en otros como norma de estricta aplicabilidad al Reglamento de la UE, a pesar de que se trata de niveles de Cd en granos sin procesar. Al respecto, se muestran concepciones distintas respecto a la aplicación del Reglamento de la UE:

1. **Autores que diferencian la aplicabilidad del reglamento de la UE**, entre ellos Barraza y col. (2017) y Furcal y Torres (2020) explican que la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria no ha establecido un límite para el Cd en la materia prima del chocolate, y que los estudios demuestran que las concentraciones de

Cd en granos pueden alcanzar niveles superiores a lo establecido por la UE.

2. **Autores que diferencian, pero consideran indistinta su aplicabilidad**, entre ellos Lanza y col. (2016) señalan que el límite máximo de la UE podría aplicar de igual manera para el grano de cacao y que sus contenidos hallados de Cd ($1,62 \mu\text{g g}^{-1}$) superan el valor máximo establecido en el Reglamento de la UE.
3. **Autores que no diferencian la aplicabilidad del reglamento de la UE**, entre ellos Gramlich y col. (2018), señalan que las concentraciones de Cd en granos ($1,1 \mu\text{g g}^{-1}$) exceden el límite propuesto por la UE. Con este mismo criterio, Arévalo y col. (2017a) clasifican como altos los niveles de Cd ($1,13 \mu\text{g g}^{-1}$) en granos de cacao cultivado en las regiones de Amazonas, Piura y Tumbes (Zona norte del Perú) en alusión a la norma de la UE. Florida, Claudio y Gómez (2018) clasifican sus niveles de Cd ($0,98 \mu\text{g g}^{-1}$), como mayor al permitido por la UE. También, Zug y col. (2019) señalan el Cd en semillas de cacao peruano como el más alto con los límites permitidos, en particular el CCN-51 en comparación al cacao fino y de sabor. Finalmente, Chávez y col. (2015) no solo aplican incorrectamente el Reglamento, también se equivocan al señalar que el Cd en granos por encima de un nivel crítico $0,6 \mu\text{g g}^{-1}$ causaría preocupación en el consumo de chocolate a base de cacao, cuando el Reglamento tolera hasta $0,8 \mu\text{g g}^{-1}$.

4 Reglamento 488/2014 UE

El actual reglamento de la UE a cargo de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) fue elaborado por la Comisión Técnica de Contaminantes de la Cadena Alimentaria (CONTAM). La EFSA consideró necesario modificar nuevamente los niveles máximos para ciertos contaminantes como el Cd, consignados en el Reglamento 1881/2006, incorporando nueva información y los avances del Codex Alimentarius (Unión Europea-UE, 2014; Zug y col., 2019; Furcal y Torres, 2020).

El Reglamento actual de la UE se basa en tres aspectos fundamentales:

1. **Exposición alimentaria;** la CONTAM realizó los estudios de ingesta semanal tolerable y determinó la exposición alimentaria media de Cd en los países europeos de $2,5 \mu\text{g/kg}$ de peso corporal (Unión Europea-UE, 2014; Abt y Lauren, 2020).
2. **El consumo per cápita;** un elevado consumo de derivados del cacao puede elevar los niveles de cadmio en el cuerpo (Tabla 2); y en el caso de la comunidad europea los consumos per cápita triplican los consumos de países Latinoamericanos.
3. **Principio de ALARA,** por sus siglas en inglés "As Low As Reasonably Achievable" que significa tan bajo como sea razonablemente alcanzable o posible (Unión Europea-UE, 2014).

Para la EFSA es razonable que la reducción a la exposición de los consumidores vulnerables podría lograrse mediante el establecimiento de un contenido máximo a los derivados del cacao. Así, el 12 de mayo del 2014 fue aprobado el Reglamento 488/2014 que modifica el Reglamento 1881/2006 (Tabla 3), donde se añade a la lista de productos controlados los derivados del cacao (Unión Europea-UE, 2014; Gramlich y col., 2018; Kruszewski, Wiesław y Kowalska, 2018; Argüello y col., 2019; Barraza y col., 2019; Romero y col., 2019; Zug y col., 2019; Abt y Lauren, 2020).

Este Reglamento asigna un alto valor a chocolates con porcentaje total de materia seca $\geq 50\%$ (Antolínez y col., 2020), establece límites tolerables para Cd en cuatro tipos de chocolate (consumo final), pero utiliza argumentos de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y es poco coherente al fijar valores similares a alimentos muy diferentes en origen y representatividad en la exposición alimentaria total de cadmio de los consumidores. De igual forma, tiene valores con exceso y sin base científica suficiente que pueden convertirse en trabas para el proceso productivo y representar obstáculos técnicos al comercio, al confundir los límites tolerables en los productos derivados o procesados para la comercialización del cacao en grano (Pastor, 2017).

5 Propuestas de límites máximos para cacao sin procesar

La categorización de los niveles de cadmio total en granos sin procesar utilizando el Reglamento 488/2014 es un error (Pastor, 2017; Meter, Atkinson y Laliberte, 2019), pues la precitada norma de la UE (Tabla 3) no es aplicable a granos enteros sin procesar, aunque, como ya se explicó, la mayoría de los autores señalan que sus valores encontrados superan lo establecido por la UE que fija un máximo de $0,8 \mu\text{g g}^{-1}$, por lo que tácitamente se entiende que se está usando este límite para clasificar sus niveles encontrados. Debe tomarse en cuenta que la inmensa mayoría del cacao se exporta desde Perú y otros países de la región en forma de grano fermentado seco (MINAGRI, 2019). Paradójicamente, los límites tolerables para chocolate están siendo utilizados para juzgar y ajustar el precio del grano sin procesar (Pastor, 2017). Por tanto, a continuación se analizan algunas propuestas que no alteran los criterios que originaron el actual Reglamento e incorporan nuevos criterios como una simple relación de proporcionalidad (Meter, Atkinson y Laliberte, 2019).

a) Propuesta de Meter

Una de las propuestas para niveles de Cd en granos ha sido establecida por Meter, Atkinson y Laliberte (2019), quienes aplican una relación de proporcionalidad a los límites fijados en el Reglamento de la UE y calculan un valor límite máximo de Cd en granos secos sin procesar, ya que la masa sin procesar contiene una cantidad similar de Cd al de los granos de origen.

Esta propuesta asume los siguientes conceptos:

- La regulación 488/2014 es para productos procesados.
- La concentración de Cd en masa es similar al licor de cacao (primer derivado del procesamiento).
- Se conoce el % de masa en el chocolate
- La manteca contiene niveles mínimos de Cd (criterio no aplicado en su fórmula)
- Proporcionalidad

La fórmula de cálculo es:

$$MLCM = \frac{MLEU \cdot P}{X \% P} \quad (1)$$

Donde:

$$MLCM = \frac{0,8}{0,7} = 1,14 \mu\text{g g}^{-1} \quad (2)$$

$MLCM$ = Nivel máximo de Cd en la masa del cacao ($\mu\text{g g}^{-1}$)

$MLEU \cdot P$ = Nivel máximo de la UE en producto final P ($\mu\text{g g}^{-1}$)

$X \% P$ = Porcentaje de masa en producto terminado P

de masa (sólidos secos de cacao), y la UE establece $0,8 \mu\text{g g}^{-1}$ de Cd en el producto terminado, por lo que el nivel máximo de Cd será:

Se puede observar que los niveles máximos de la UE son para los productos terminados y no para la materia prima. La ecuación estima un nivel máximo de Cd en la masa de $1,14 \mu\text{g g}^{-1}$ que garantizará que el producto final permanezca por debajo del umbral fijado por la UE.

Pone como ejemplo el chocolate oscuro con 70 %

Tabla 1. Cd en granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en países Latinoamericanos

Referencias	País	Media de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Min. – Max.	Método determinación	Nivel reportado, según Reglamento N° 488/2014
Furcal y Torres (2020)	Costa Rica	$0,44 \pm 0,64^*$ $2,25 \pm 2,06^{***}$	0,0 – 1,8 0,0 – 8,7	ICP OES	Nb Na
Argüello y col. (2019)		$0,9 \pm -$	-	ICP MS	Na
Barraza y col. (2019)		$1,26 \pm 0,18$	-	ICP-MS	Na
Barraza y col. (2017)		$1,12 \pm -$	-	ICP-MS	Na
Chávez y col. (2015)	Ecuador	$0,94 \pm -$	-	EAA	Na
Mite, Carrillo y Durango (2010)		$0,84 \pm 0,32$	0,32 – 1,80	EAA	Na
Romero y col. (2019)		$0,75 \pm -$	-	ICP OES	Nb
Lanza y col. (2016)	Venezuela	$1,62 \pm -$	0,95 – 2,09	ICP OES	Na
Oliveira y col. (2019)	Brasil	$0,13 \pm -$	0,04 – 0,82	ICP OES	Nb
Gramlich y col. (2018)	Honduras	$1,10 \pm 0,2$ $1,13^* \pm -$	- -		Na Na
Arévalo y col. (2017a)		$0,45^{**} \pm -$ $0,20^{***} \pm -$	- -	ICP OES	Nb Nb
Florida, Claudio y Gómez (2018)	Perú	$0,98 \pm 1,42$	0,18 – 6,7	EAA	Na
Tantalean y Huauya (2017)		$1,08 \pm -$	-	EAA	Na
Zug y col. (2019)		$2,46 \pm 0,75$	0,2 – 12,56	GFAAS	Na
Resultados que superan los límites según este criterio (%)					70,59

*zona norte, **zona central, ***zona sur del país correspondiente, Na nivel alto, Nb nivel bajo, EAA espectrofotómetro de absorción atómica, ICP OES espectrometría de emisión óptica con acoplamiento inductivo, ICP-MS Espectroscopia de masas de plasma con acoplamiento inductivo, GFAAS espectrómetro de absorción atómica de horno de grafito, - no especificado por el autor.

b) Propuesta del autor

La propuesta toma como base los cálculos de Meter, Atkinson y Laliberte (2019), las conclusiones de Pastor y Gutierrez (2016) y Pastor (2017) y los conceptos generales de la composición bromatológica media del chocolate y de los granos sin proce-

sar (Tabla 4); por lo tanto, la propuesta asume los siguientes conceptos:

- Químicamente el cacao está constituido por: Grasa o manteca de cacao 53,05% usado para chocolate y la diferencia es torta de cacao utilizado para cacao en polvo edulcorado pa-

ra beber (Morales, García y Méndez, 2012), y toma el factor de 0,5 (% TA).

- Los chocolates amargos poseen manteca de cacao y en promedio no superan el 50% (Sánchez y col., 2016).
- En el chocolate al 70% de manteca de cacao, el contenido de Cd se reduce a menos de la mitad en el chocolate en comparación al grano, por ello, se aplica un factor de 0,5 (RP) (Pastor y Gutierrez, 2016).
- La manteca contiene niveles mínimos de Cd (Meter, Atkinson y Laliberte, 2019), aspecto que no fue considerado en su fórmula y confirma lo señalado por Pastor y Gutierrez (2016).
- Los granos bioacumulan cadmio en concentraciones variadas según el genotipo de cacao (Tabla 5), con una variación aproximada de 30%, proporción que debe eliminarse aplicando un factor de 0,7 (VG) a los resultados parciales de manteca y torta de cacao.

Tabla 2. Consumo per cápita de chocolate en Europa y América Latina

Continente	País	Consumo anual por persona (kg)	Barras anuales (barra / 70g)	Barras/mes
Europa	Suiza	11,9	170	14
	Irlanda	9,9	141	12
	Reino Unido	9,5	136	11
	Austria	8,8	126	10
	Bélgica	8,3	119	10
	Alemania	8,2	117	10
Media		9,43 ± 1,38	134,8 ± 19,61	11,17 ± 1,6
América	Uruguay	3,1	44	3,7
	Argentina	2,9	41	3,5
	Chile	2,2	31	2,6
	Brasil	1,7	24	2
	México	0,7	10	0,8
	Perú	0,6	9	0,7
Media		1,87 ± 1,07	26,5 ± 15	2,22 ± 1,3

Fuente: Jiménez (2015)

Tabla 3. Límites tolerables Reglamento 488/2014

Producto	Materia seca (%)	Límite máximo Permitido ($\mu\text{g g}^{-1}$)*
Chocolate de leche	<30	0,1
Chocolate de leche	≥ 30	0,3
Chocolate	< 50	0,3
Chocolate	≥ 50	0,8
Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber)		0,6

* Entraron en vigencia desde enero del 2019

Fuente: Unión Europea-UE (2014), Zug y col. (2019) y Abt y Lauren (2020)

Según la Tabla 5, los productos del procesamiento primario de los granos son aproximadamente 50% de torta de cacao usado para chocolate en polvo edulcorado para beber y con un límite tolerable según la UE de $0,6 \mu\text{g g}^{-1}$ y manteca de cacao en proporciones similares al 50%, usados para chocolates con un nivel máximo de $0,8 \mu\text{g g}^{-1}$ (Sánchez y col., 2016). La propuesta sugiere que deben calcularse por separado la manteca (Fórmula 4) y la torta (Fórmula 5), y en ambos casos se debe incorporar la variación por genotipo (Tabla 5), para reducir en un 30% este resultado parcial, aplicando un factor de 0,7; finalmente debe promediarse para obtener un límite máximo (Fórmula 3). Por lo que la fórmula para el cálculo es:

$$LCP = \frac{LCMC + LCTC}{2} \quad (3)$$

$$LCMC = \frac{FM}{RP} \times VG \quad (4)$$

$$LCTC = \frac{MCP}{\%TA} \times VG \quad (5)$$

Donde:

LCP = Límite de Cd propuesto

$LCMC$ = Límite de Cd en manteca de cacao

$LCTC$ = Límite de Cd en torta de cacao (chocolate en polvo)

FM = Fórmula de Meter, Atkinson y Laliberte (2019), obtiene un límite máximo de $1,14 \mu\text{g g}^{-1}$

RP = Reducción de Cd reportado por Pastor y Gutierrez (2016)

VG = Variabilidad por genotipo, se eliminó el 30% (aplicando un factor 0,7 al contenido de Cd en manteca y torta de cacao)

MCP = Máximo para cacao en polvo según UE ($0,6 \mu\text{g g}^{-1}$)

$\%TA$ = % de torta en granos sin procesar 50% (factor 0,5)

Como ejemplo, se utiliza el chocolate oscuro con 70% de masa de cacao ($0,8 \mu\text{g g}^{-1}$), usado y calculado en la fórmula Meter, Atkinson y Laliberte (2019):

$$LCMC = \frac{1,14}{0,5} \times 0,7 = 1,6 \mu\text{g g}^{-1} \quad (6)$$

$$LCTC = \frac{0,6}{0,5} \times 0,7 = 0,84 \mu\text{g g}^{-1} \quad (7)$$

$$LCP = \frac{1,6 + 0,84}{2} = 1,22 \mu\text{g g}^{-1} \quad (8)$$

La ecuación propuesta estima un nivel máximo de Cd en granos sin procesar de $1,22 \mu\text{g g}^{-1}$ (Fórmula 8) garantizando que el producto final procesado esté por debajo del límite fijado por la UE ($0,8 \mu\text{g g}^{-1}$). Por tanto, de acuerdo con la propuesta de Meter, Atkinson y Laliberte (2019) la categorización de los reportes científicos (Tabla 6) varían razonablemente.

La Tabla 6 muestra que la propuesta del autor supera ligeramente a Meter, Atkinson y Laliberte (2019) y es similar a lo establecido en Indonesia, que establece límites máximos de $1 \mu\text{g g}^{-1}$ para masa de cacao. Además, el % de resultados que superarían los límites son similares al comparar los reportes disponibles, sin embargo, en comparación con el Reglamento 488/2014, los niveles categorizados como altos, según los límites máximos propuestos, disminuyen de 70,59 a 23,53 %, cuya cifra es más razonable y coherente. Además, en este análisis aún no están incorporando conceptos de biodisponibilidad del metal, ya que las investigaciones revelan una gran dinámica en concentración y disponibilidad en suelos (Prieto y col., 2009; Kabata, 2010; Sánchez, Rivero y Martínez, 2011; Bravo, Arboleda y Martín, 2014; Gramlich y col., 2017; Díaz y col., 2018; Gramlich y col., 2018; Zug y col., 2019), que pueden contribuir o limitar la movilización y captación del cadmio por el cacao. Por tanto, es necesario que se tomen las acciones correspondientes para subsanar el vacío normativo en protección de la salud y de los millones de productores de cacao en LA y el mundo.

6 Implicancia del vacío normativo en el productor y la sustitución de cultivos ilícitos

En la última década el cacao fue el segundo cultivo alternativo a la sustitución de la hoja de coca en el Perú (INEI, 2017). El cacao es el cultivo más exitoso en la sustitución del cultivo ilegal de la coca, y miles de pequeños agricultores familiares han sido rescatados del sembrado de la coca gracias al promisorio cultivo del cacao (Pastor y Gutierrez, 2016). Solo en Perú se cultiva en 16 regiones, 57 provincias y 259 distritos (MINAGRI, 2019) y de igual forma Colombia, Bolivia y Ecuador muestran un crecimiento sostenido en la producción de cacao y una reduc-

ción de cultivos ilícitos (Celis, Florida y Rengifo, 2020).

De manera general, en estos países de la región la sostenibilidad de la producción de cacao se encuentra amenazada (Argüello y col., 2019; Abt y Lauren, 2020) y se pueden identificar algunos aspectos influyentes, entre ellos:

1. **Reglamento 488/2014;** La imposición normativa de la UE de un límite máximo muy alto a los derivados del cacao, considerando que más del 60% del volumen de producción de América Latina se exportan hacia la UE (MINAGRI, 2016; Meter, Atkinson y Laliberte, 2019).
2. **Erradicación forzada;** países como Perú, a través de la Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas - DEVIDA y la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional- USAID, realizan la erradicación forzada, eliminando en su totalidad el cultivo ilícito de la hoja de coca, trayendo mayores desequilibrios socioeconómicos (Chocce, 2015).
3. **Ineficiencia de la inversión pública;** causado por factores individuales e institucionales. Los proyectos alternativos (cacao) al cultivo ilícito de la hoja de coca y los proyectos de desarrollo rural no generan mejoras socioeconómicas que el productor espera; esto se evidenció en Perú (Alvarado, Ferrer y Florida, 2020) y en Ecuador (Viteri, 2013) y es muy probable que ocurra lo mismo en los demás países productores de la región.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica en granos de cacao (*Theobroma cacao* L.)

Parámetros	Origen del cultivo	Contenido medio
Físicos		
Cascarilla %		11-12
Peso del grano (g)		1,05 – 1,2
Humedad (%)		7-8
Químicos*		
Grasa (%)	Cacao de montaña	55
	Bosque húmedo tropical	54
	Valles interandino seco	54
Proteína (%)	Cacao de montaña	14
	Bosque húmedo tropical	13
	Valles interandino seco	13
pH	Cacao de montaña	5,07
	Bosque húmedo tropical	4,97
	Valles interandino seco	5,54
Fibra (%)	Cacao de montaña	3
	Bosque húmedo tropical	3
	Valles interandino seco	3
Calorías (kcal/100 g)	Cacao de montaña	629
	Bosque húmedo tropical	629
	Valles interandino seco	625

* Calculado a partir del estudio de 15 genotipos de cacao
Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MINAGRICULTURA (2004)

Lo delicado de esto es que tanto la erradicación forzada como la ineficiencia en la inversión pública son problemas con las que nuestra región ha convivido por décadas y la aparición y vigencia del Reglamento 488/2014 juega un rol desencadenante a los anteriores, en este caso desfavorable para el productor, y puede desalentar a las familias que han sustituido el cultivo de la coca por el cacao (Pastor, 2017; Abt y Lauren, 2020). Por lo tanto, los niveles tolerables de Cd en cacao procesado fijado por la UE y aplicados para clasificar los niveles en granos sin procesar es un error (Pastor, 2017; Meter, Atkinson y Laliberte, 2019) y requiere que los organismos como el Codex y la UE considere evaluar, recalculan y consignar límites tolerables de Cd en granos de cacao sin procesar, para evitar el sobredimensionamiento de la problemática que representa hoy la presencia de este metal en el cacao de América Latina.

Para contextualizar las implicancias, hasta el 2016 en LA y el Caribe, el cultivo se ha difundido a nivel comercial en 23 países, con un volumen superior a las 675 000 t y alrededor de 1 700 000 ha, donde Brasil, Ecuador, República Dominicana, Perú, Colombia y México representan más del 90% de la producción (Arvelo y col., 2017) y al 2018 LA aporta con más del 18% de la importación mundial

de cacao en grano (836 000 t en el período 2017 - 2018) y en casos como el Perú, del total exportado en 2018, el 54,3% corresponde a cacao en granos sin procesar (López, Cunias y Carrasco, 2020). Además, países como Ecuador, Perú y Colombia han mostrado un crecimiento medio mayor a 9% anual en la última década (MINAGRI, 2016; Meter, Atkinson y Laliberte, 2019), y en Ecuador pasó de 3 a 6% de la producción mundial, llegando a ocupar el cuarto lugar entre los países productores, superando a Brasil (Cunha, 2018).

Finalmente, la falta de límites máximos al cacao sin procesar es advertida como amenaza a la sostenibilidad de la producción de cacao (Argüello y col., 2019; Abt y Lauren, 2020) y viene causando algunas confusiones y especulaciones, entre ellas: a) confusión en la comunidad científica al clasificar cacao sin procesar, aplicando los límites de la norma europea para cacao procesados; b) sobredimensionada preocupación al sector cacaotero en toda nuestra región de América Latina y c) distorsiones de mercado al momento de negociar, pues el productor difícilmente está en condiciones de rebatir y los compradores prefieren contenidos bajos de Cd para garantizar su utilización en cualquier receta, con el consiguiente efecto negativo en el precio que recibe por el grano (Pastor, 2017; Meter, Atkinson y Laliberte, 2019).

Tabla 5. Niveles de Cd en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.)

Referencia	Genotipo	Cd granos ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Barraza y col. (2017)	CCN-51	1,21
	Nacional Ecuatoriano	0,89
	HNF	2,09
	PNF	1,9
	PF	1,82
Lanza y col. (2016)	PFC	1,76
	HF	1,74
	PFM	1,57
	HFC	1,1
	HFM	0,95
Florida, Claudio y Gómez (2018)	CCN-51	0,98
Concentración media		1,45+0,43
CV (%)		29,65

CV Coeficiente de variación

Tabla 6. Comparación de la clasificación de niveles de cadmio

Referencias	País	Media de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Nivel según Reglamento N° 488/2014	Nivel según Meter, Atkinson y Laliberte (2019) ^a	Nivel según propuesta del Autor ^b
Furcal y Torres (2020)	Costa Rica	0,44*	Nb	Nb	Nb
		2,25***	Na	Na	Na
Argüello y col. (2019)		0,9	Na	Nb	Nb
Barraza y col. (2019)		1,26	Na	Na	Na
Barraza y col. (2017)		1,12	Na	Nb	Nb
Chávez y col. (2015)	Ecuador	0,94	Na	Nb	Nb
Mite, Carrillo y Durango (2010)		0,84	Na	Nb	Nb
Romero y col. (2019)		0,75	Nb	Nb	Nb
Lanza y col. (2016)	Venezuela	1,62	Na	Na	Na
Oliveira y col. (2019)	Brasil	0,13	Nb	Nb	Nb
Gramlich y col. (2018)	Honduras	1,1	Na	Nb	Nb
		1,13*	Na	Nb	Nb
Arévalo y col. (2017a)		0,45**	Nb	Nb	Nb
		0,20***	Nb	Nb	Nb
Florida, Claudio y Gómez (2018)	Perú	0,98	Na	Nb	Nb
Tantalean y Huauya (2017)		1,08	Na	Nb	Nb
Zug y col. (2019)		2,46	Na	Na	Na
Resultados que superan los límites según criterios (%)			70,59	23,53	23,53

^aMax: 1.14 $\mu\text{g g}^{-1}$, ^bMax: 1.22 $\mu\text{g g}^{-1}$, Na: nivel alto, Nb: nivel bajo

7 Conclusiones

Los reportes científicos revelan avances importantes sobre el Cd en granos de cacao. En la región, los valores medios más altos reportados lo encabezan Perú, Costa Rica, Venezuela y Ecuador. Además, el Reglamento N° 488/2014 de la Unión Europea establece límites máximos para cacao procesados, y está siendo utilizado como base para clasificar la concentración de cadmio en granos sin procesar, generando confusión en la comunidad científica y sobredimensionada preocupación al sector cacaotero.

Existen propuestas de cálculo para determinar un límite máximo razonable y científico, incorporando criterios de proporcionalidad, variabilidad genética y aspectos bromatológicos del cacao, tomando como base los límites ya establecidos en el reglamento de la Unión Europea. Las propuestas de cálculo determinan un límite máximo de cadmio en granos sin procesar de 1,14 (Meter) y 1,22 $\mu\text{g g}^{-1}$ (autor), reduciendo los niveles categorizados como altos (según la UE), de 70,59 a solo 23,53%, cifra razonable y coherente que contribuirá a mantener la calidad del producto para el consumidor final, evitar distorsiones del mercado protegiendo al produc-

tor y a los esfuerzos de sustitución del cultivo ilegal de la coca en Perú, Colombia, Bolivia y otros países de la región.

Referencias

- Abt, E. y P. Lauren (2020). «Perspective on Cadmium and Lead in Cocoa and Chocolate». En: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 68.46, 13008-13015. Online: <https://bit.ly/3xIThQf>.
- Alvarado, Y., R. Ferrer y N. Florida (2020). «Evaluación ex post al proyecto productivo alternativo de Bella Bajo Monzón». En: *Ciencia Unemi* 13.34, 47-58. Online: <https://bit.ly/3ubF2kM>.
- Antoine, J. y col. (2017). «Assessment of the potential health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica». En: *Toxicology Reports* 4, 181-187. Online: <https://bit.ly/3xIuPhS>.
- Antolinez, E. y col. (2020). «Estado actual de la caocultura: una revisión de sus principales limitantes». En: *Ciencia y Agricultura* 17.2, 1-11. Online: <https://bit.ly/3eLlxch>.
- Arévalo, E. y col. (2017a). «Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Pe-

- ru». En: *Science of The Total Environment* 605-606, 792-800. Online: <https://bit.ly/33fbPt3>.
- Arévalo, H. y col. (2017b). «Metales pesados en suelos, hojas y granos de zonas cacaoteras del Perú». En: *International Symposium on Cocoa Research (ISCR) 2017*, 1-6. Online: <https://bit.ly/33AeRbJ>.
- Argüello, D. y col. (2019). «Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador». En: *Science of The Total Environment* 649, 120-127. Online: <https://bit.ly/2Re36Vs>.
- Arvelo, S. y col. (2017). *Estado actual sobre la producción, el comercio y cultivo del cacao en américa*. Online: <https://bit.ly/3ecahXm>. IICA-bba.
- Barraza, F. y col. (2017). «Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador». En: *Environmental Pollution* 229, 950-963. Online: <https://bit.ly/3tDWPA2>.
- Barraza, F. y col. (2019). «Cadmium isotope fractionation in the soil cacao systems of Ecuador: a pilot field study». En: *The Royal Society of Chemistry* 9.58, 34011-34022. Online: <https://rsc.li/3vBUS8x>.
- Bravo, I., C. Arboleda y F. Martin (2014). «Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas altoandinos de Colombia». En: *Acta Agronómica* 63.2, 164-174. Online: <https://bit.ly/3ePtXPD>.
- Castebianco, J. (2018). «Heavy metals remediation with potential application in cocoa cultivation». En: *La Granja* 27.1, 21-35. Online: <https://bit.ly/33ffMhn>.
- Celis, R., N. Florida y A. Rengifo (2020). «Impacto sobre indicadores físicos y químicos del suelo con manejo convencional de coca y cacao». En: *CIENCIA UNEMI* 13.33, 1-9. Online: <https://bit.ly/3vyOZJe>.
- Chávez, E. y col. (2015). «Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador». En: *Science of The Total Environment* 533, 205-214. Online: <https://bit.ly/3eMSDIF>.
- Chocce, D. (2015). «Funciones de la Hoja de Coca durante el proceso de Violencia Política en el centro poblado de San José de Villa Vista, distrito de Chungui, provincia La Mar, región Ayacucho.» tesis de grado. Facultad de Antropología-Universidad Nacional del Centro del Perú. Online: <https://bit.ly/3taqe4j>.
- Cunha, L. (2018). *Estudo de competitividade do cacau e chocolate no Brasil: desafios na produção e comércio global*. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior-MDIC. Brasil. Online: <https://bit.ly/3gSHicM>.
- Díaz, U. y col. (2018). «Determinación de Cadmio y Plomo en almendras de cacao (*Theobroma cacao*), proveniente de fincas de productores orgánicos del cantón Vinces». En: *Espirales* 12.15, 77-92. Online: <https://bit.ly/3ebPZgv>.
- Engbersen, N. y col. (2019). «Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars». En: *Science of The Total Environment* 678.678, 660-670. Online: <https://bit.ly/3edGmOc>.
- Florida, N. y col. (2019). «Efecto de compost y NPK sobre los niveles de microorganismos y cadmio en suelo y almendra de cacao». En: *Journal of High Andean Research* 21.4, 264-273. Online: <https://bit.ly/3nLIHDm>.
- Florida, R., M. Claudio y B. Gómez (2018). «El pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao* L.) en Leoncio Prado, Huánuco, Perú». En: *Folia Amazónica* 27.1, 1-8. Online: <https://bit.ly/3nNNxjx>.
- Furcal, P. y J. Torres (2020). «Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica». En: *Tecnología en Marcha* 33.1, 122-137. Online: <https://bit.ly/3eXdysN>.
- Gramlich, A. y col. (2017). «Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management». En: *Science of The Total Environment* 580, 677-686. Online: <https://bit.ly/3nXXJGp>.
- Gramlich, A. y col. (2018). «Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras». En: *Science of The Total Environment* 612.580, 370-378. Online: <https://bit.ly/2SsNYEj>.
- Gunnar, N. (2013). «Encyclopaedia of health and safety at work». En: vol. 63. 10. Cap. Metals: chemical properties and toxicity. Online: <https://bit.ly/3b0UCrP>.
- He, S. y col. (2015). «Soil biogeochemistry, plant physiology, and phytoremediation of cadmium-contaminated soils». En: *Advances in Agronomy* 134, 135-225. Online: <https://bit.ly/3gZEIII>.
- Hernández, C. y col. (2017). «Metales pesados en suelos, hojas y granos de zonas cacaoteras del Perú». En: *International Symposium on Cocoa Re-*





- search (ISCR) 2017, 13-17. Online: <https://bit.ly/3ok4tP3>.
- INEI (2017). *Encuesta nacional Agropecuaria 2017 - Principales resultados pequeñas, medianas y grandes unidades agropecuarias*. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Online: <https://bit.ly/3xZloe9>.
- Jiménez, C. (2015). «Global legal status of cadmium in cacao (*Theobroma cacao*): a fantasy or a reality». En: *Producción+ Limpia* 10.1, 89-104. Online: <https://bit.ly/2QTDtM>.
- Kabata, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*. Taylor Francis Group. Online: <https://bit.ly/3uH0y0L>.
- Kruszewski, B., O. Wiesław y J. Kowalska (2018). «Nickel, cadmium and lead levels in raw cocoa and processed chocolate mass materials from three different manufacturers». En: *Journal of Food Composition and Analysis* 66, 127-135. Online: <https://bit.ly/3ejjDAE>.
- Lanza, J. y col. (2016). «Evaluación del contenido de metales pesados en cacao (*teobroma cacao* L.) de santa bárbara del Zulia, Venezuela». En: *Saber* 28.1, 106-115. Online: <https://bit.ly/3h9OsJD>.
- López, Y., M. Cunias y Y. Carrasco (2020). «El cacao peruano y su impacto en la economía nacional». En: *Revista Universidad y Sociedad* 12.3, 344-352. Online: <https://bit.ly/3tqF9rj>.
- MINAGRI (2016). *Estudio del cacao en el Perú y en el mundo; Situación Actual y Perspectivas en el Mercado Nacional e Internacional al 2015*. MINAGRI-DGPA-DEEIA. Online: <https://bit.ly/3bb7DyY>.
- (2019). «Ministerio de Agricultura y Riego-Dirección General de Políticas Agrarias; Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria. Observatorio del Cacao». Online: <https://bit.ly/33sWhCl>.
- MINAGRICULTURA (2004). *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. El beneficio y características fisicoquímicas del cacao (*Theobroma cacao* L.)*. Inf. téc. MINAGRICULTURA- FEDECACAO Colombia. Online: <https://bit.ly/3etUHX7>.
- Meter, A., R. Atkinson y B. Laliberte (2019). *admio en el cacao de América Latina y el Caribe. Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación*. 84pp. Bioversity International. Online: <https://bit.ly/3baFnwA>. Roma.
- Mite, F., M. Carrillo y W. Durango (2010). «Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almen dras de cacao, suelos y aguas en Ecuador». En: 2010 *Actas XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*, 1-21. Online: <https://bit.ly/3uwZk8L>.
- Morales, J., A. García y E. Méndez (2012). «¿Qué sabe usted acerca de... Cacao?» En: *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas* 43.4, 79-81. Online: <https://bit.ly/3vHJBDI>.
- Oliveira, A. y col. (2019). «Cádmio e chumbo em amêndoa de cacau do Brasil». En: 2019 *Anais do 13º Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos (SLACA)*, 1-2. Online: <https://bit.ly/3nXtoaM>.
- Pastor, S. (2017). «Niveles de cadmio en el chocolate: NM y ECA, sí; OTC, no». En: *International Symposium on Cocoa Research (ISCR) 2017*, págs. 1-5.
- Pastor, S. y M. Gutierrez (2016). «Sobre Los Fundamentos De Una Norma Que Regula El Cadmio En Los Alimentos Y Presume Del Mismo En El Suelo». En: *Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, 24-28. Online: <https://bit.ly/3bbe4SE>.
- Pérez, G. y C. Azcona (2012). «The effects of cadmium on health». En: *Magazine of Specialties Médico-Quirúrgicas* 17.3, 199-205. Online: <https://bit.ly/3bbiSHA>.
- Prieto, J. y col. (2009). «Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua». En: *Tropical and subtropical Agroecosystems* 10.1, 29-44. Online: <https://bit.ly/3o4Y7CP>.
- Raju, M. y col. (2020). «Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view». En: *Science of The Total Environment* 720.10, 137645. Online: <https://bit.ly/3trMbfl>.
- Reyes, Y. y col. (2016). «Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria». En: *Ingeniería Investigación y Desarrollo* 16.2, 66-77. Online: <https://bit.ly/3uEHhgD>.
- Romero, D. y col. (2019). «Content and the relationship between cadmium, nickel, and lead concentrations in Ecuadorian cocoa beans from nine provinces». En: *Food control* 106.106750, 1-8. Online: <https://bit.ly/3fdW9fd>.
- Sánchez, Á. y col. (2016). «Caracterización bromatológica de los productos derivados de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Chontalpa, Tabasco, México». En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 7.1, 2817-2830. Online: <https://bit.ly/3eXHCnY>.
- Sánchez, N., C. Rivero e Y. Martínez (2011). «Cadmio disponible en dos suelos de Venezuela: efec-

- to del fósforo». En: *Revista Ingeniería UC* 18.2, 7-14. Online: <https://bit.ly/3vHNYyC>.
- Tantalean, E. y M. Huauya (2017). «Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana». En: *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable* 1.2, 69-78. Online: <https://bit.ly/3hb07rN>.
- Unión Europea-UE (2014). *Regulation No. 488/2014. They modify EC Regulation No 1881/2006 regarding the maximum content of cadmium in food products*. Inf. téc. Official Journal of the European Union. Online: <https://bit.ly/3uvfOxT>.
- Viteri, O. (2013). «Evaluación de la Sostenibilidad de los cultivos café y cacao en las provincias Orellana y Sucumbíos-Ecuador». Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. Online: <https://bit.ly/3nZY3o4>.
- Zug, K. y col. (2019). «Cadmium Accumulation in Peruvian Cacao (*Theobroma cacao* L.) and Opportunities for Mitigation». En: *Water, Air, Soil Pollution* 230.3, 72-80. Online: <https://bit.ly/3to8x1q>.



INDUCCIÓN *IN VITRO* DE CALLOS A PARTIR DE EXPLANTES FOLIARES EN ROCOTO (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.)

IN VITRO INDUCTION OF CALLUS FROM FOLIAR EXPLANTS IN ROCOTO (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.)

Angel David Hernández-Amasifuen*, Alexis Argüelles-Curaca, Anthony
Apolinario Cortez-Lázaro y Hermila Belba Díaz-Pillasca

Laboratorio de Biotecnología Vegetal, Escuela Profesional de Biología con mención en Biotecnología. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Av. Mercedes Indacochea N° 609, Huacho, Perú.

*Autor para correspondencia: adhernandz@hotmail.com

Manuscrito recibido el 25 de octubre de 2019. Aceptado, tras revisión, el 17 de noviembre 2020. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

El rocoto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.) es una planta oriunda de Perú, empleada en la gastronomía nacional, tiene un gran valor nutricional, y presenta propiedades farmacéuticas y medicinales. El cultivo es susceptible a enfermedades causada por fitopatógenos, los cuales son diseminados por semillas de cultivares o almácigos infectados. Mediante el uso de herramientas biotecnológicas como el cultivo de tejidos vegetales *in vitro* se puede obtener plantas libres de patógenos, de buena calidad y de gran potencial agronómico. Por lo tanto, el presente trabajo se planteó como objetivo desarrollar una metodología para la inducción *in vitro* de callos a partir de hojas en rocoto. Se emplearon plántulas de rocoto germinadas *in vitro*, de las cuales se seleccionaron las primeras hojas verdaderas que fueron seccionadas en explantes de 1 cm y colocadas en diferentes medios de cultivo MS adicionadas con ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D). Se evaluó la respuesta de inducción a callogénesis en cinco tratamientos con diferentes concentraciones de 2,4-D (0; 0,25; 0,5; 0,75 y 1 mg l⁻¹), en condiciones de 25 °C en oscuridad durante 35 días. Los medios de cultivo adicionados con 0,75 y 1 mg l⁻¹ de 2,4-D permitieron obtener 100% de inducción de callos en las hojas de rocoto con 81 % y 86% respectivamente de formación de callos de grado 3. Este estudio, pionero para la especie, abre expectativas en programas de mejoramiento para su potencial uso.

Palabras clave: Biotecnología, tejido vegetal, callogénesis, hojas, germinación.

Abstract

Rocoto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.) is a native plant of Peru, used in the national gastronomy with great nutritional value; it has pharmaceutical and medicinal properties. The crop is susceptible to diseases caused by phytopathogens, which are spread by seeds of infected cultivars or seedlings. Through the use of biotechnological tools such as *in vitro* plant tissue culture, it is possible to obtain plants free of pathogens, of good quality and great agronomic potential. Therefore, the present work aimed to develop a methodology for the *in vitro* induction of callus from hot pepper leaves. *In vitro* germinated rocoto seedlings were used, from which the first true leaves were selected, which were sectioned into 1 cm explants and placed in different MS culture media added with 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D). The induction response to callogenesis was evaluated in five treatments with different concentrations of 2,4-D (0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1 mg l⁻¹), under conditions of 25 °C in the dark for 35 days. The culture media added with 0.75 and 1 mg l⁻¹ of 2,4-D allowed to obtain 100 % induction of calluses in the hot pepper leaves with 81 % and 86 %, respectively of grade 3 callus formation. This study, pioneer for the species, is good for the potential use of breeding programs.

Keywords: Biotechnology, plant tissue, callogenesis, leaves, germination.

Forma sugerida de citar: Hernández-Amasifuen, A., Argüelles-Curaca, A., Cortez-Lázaro, A.A. y Díaz-Pillasca, H.B. (2021). Inducción *in vitro* de callos a partir de explantes foliares en rocoto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.). La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 34(2):131-140. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.09>.

IDs Orcid:

Angel David Hernández-Amasifuen: <http://orcid.org/0000-0001-8267-409X>

Alexis Argüelles-Curaca: <http://orcid.org/0000-0002-6022-9099>

Anthony Apolinario Cortez-Lázaro: <http://orcid.org/0000-0002-4812-4307>

Hermila Belba Díaz-Pillasca: <http://orcid.org/0000-0002-2491-3774>

1 Introducción

El rocoto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.) es una planta herbácea con ciclo de vida perenne que pertenece a la familia *Solanaceae*. Su centro de origen es la región andina de Perú, siendo posible encontrarse de manera silvestre en la sierra y selva alta. Esta especie se diferencia de las demás especies que pertenecen al género *Capsicum* por presentar flores con coloración púrpura o morada y por sus semillas de color negro. El fruto puede variar en forma, tamaño y color, pero se caracteriza por su picor y por esta razón es muy empleado en la gastronomía peruana. Además, el rocoto presenta propiedades farmacéuticas y medicinales, relacionadas a la capsaicina (Caballero, Márquez y Rojano, 2017).

En Perú se han definido dos variedades de rocoto, el rocoto de monte y el rocoto de huerta o serrano. El rocoto de monte es denominado de esta manera por ser cultivado en mayor parte en la selva central, presenta mayor tamaño de fruto, por lo cual existe una mayor demanda de esta variedad para la preparación del rocoto relleno. La otra variedad es el rocoto de huerta o serrano, cultivado en todas las regiones del país, mayormente en los valles andinos. El fruto de esta variedad es de menor tamaño, pero con un característico picor fuerte que se utiliza para salsas (Valdez, 2017).

La producción nacional de rocoto ha ido incrementando con una tasa anual del 5% principalmente por la gran demanda gastronómica que se viene desarrollando en país; debido a esto se considera en la actualidad como un producto de importancia nacional (Sardón, 2015). Pero también se debe considerar que este cultivo presenta susceptibilidad a la marchitez, pudrición radicular y entre otras enfermedades causadas por *Fusarium oxysporum*, *Phytophthora capsici*, *Risotonia solanacearum* y entre otros fitopatógenos. También es susceptible a daños causados por virus que pueden llegar a causar amarillamiento en las nervaduras, deformaciones en hojas y frutos, enanismo, falta de vigor y caída de las hojas. La principal causa de la diseminación de estas enfermedades son las semillas provenientes de cultivares o almácigos infectados, debido que en este cultivo normalmente se emplean semillas de campañas o sembríos anteriores, y en el caso de algunos virus se diseminan al contacto entre plantas (Lucana, 2012; Hernández, Pineda y Noriega, 2019).

Es importante fortalecer la cadena de valor del rocoto, razón por la cual se busca obtener semillas de calidad y certificadas, o plántulas libres de patógenos para poder mantener cultivos más uniformes que presenten mayor calidad y producción. Dentro de las alternativas para la obtención de material vegetal aséptico se consideran a las herramientas biotecnológicas, con el empleo de técnicas de cultivo de tejidos vegetales *in vitro* (Robledo y Carrillo, 2004; Sanatombi y Sharma, 2007; Orlinska y Nowaczyk, 2015). Estas técnicas permiten la proliferación de células a partir de un explante (fragmento vegetal que puede ser meristemas, yemas axilares, hojas, raíces, anteras e incluso microsporas) en un medio de cultivo provisto de nutrientes, vitaminas, y en algunos casos también de hormonas (Levitus y col., 2010; Vélez y col., 2010; Venkataiah y col., 2016). Estos explantes, en condiciones apropiadas, inducirán a la formación de callos, que son masas amorfas o desorganizadas de células indiferenciadas. La importancia del callo radica en su funcionalidad de crecimiento irregular con potencial para formar órganos o embriones en las condiciones adecuadas (Alayón y col., 2006. Pérez y col., 2009; Terra y col., 2009; Smith, 2012; Rashmi y Trivedi, 2014).

El potencial de los callos como vía para la organogénesis y embriogénesis indirecta es una alternativa para programas de mejoramiento genético en rocoto, debido a que estos métodos en algunas especies o genotipos al ser introducidos en medios de cultivo *in vitro* con diferentes concentraciones de fitohormonas o combinaciones de estas pueden inducir a variación somaclonal, permitiendo obtener nuevas características o la eliminación de alguna indeseada (Sala y Labra, 2003; Rodríguez y col., 2014). Pero de no presentarse estas variaciones somaclonales se pueden multiplicar genotipos prometedores de buen rendimiento y buena calidad, como se viene desarrollando en el cultivo de tejidos vegetales *in vitro* en diferentes especies del género *Capsicum* (Marín, 2012; Gómez, 2016; Gutierrez-Rosati y Vega, 2017; Izquierdo, Alcaraz y Rodríguez-Álvarez, 2017).

Por lo tanto, la presente investigación se planteó el objetivo de desarrollar una metodología para la inducción de callos *in vitro* a partir de segmentos de hojas en rocoto.

2 Materiales y Métodos

La presente investigación se realizó en las instalaciones del laboratorio de Biotecnología Vegetal de la Escuela Profesional de Biología con mención en Biotecnología, ubicada en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Lima, Perú.

2.1 Desinfección del material vegetal

Se emplearon semillas de rocoto obtenidas a partir de frutos de rocotos maduros presentes en el invernadero perteneciente al laboratorio. Se lavaron las semillas con agua más detergente comercial durante 5 minutos, y luego se continuó con el proceso de desinfección en cámara de flujo laminar empleando el protocolo establecido por Hernández, Pineda y Díaz (2019). Primero se sumergieron las semillas en etanol al 70% durante 1 minuto, luego se sumergieron en una solución de hipoclorito de sodio al 2% durante 15 minutos en agitación constante. Transcurrido el tiempo se realizaron tres enjuagues con agua destilada estéril, luego fueron coladas en papel filtro y se colocaron tres semillas por tubo de ensayo con medio de cultivo MS (Murashige y Skoog, 1962).

Todos los tratamientos se mantuvieron en cámara de crecimiento (Plant Growth Chamber, LGC-5201 G, LabTech) en condiciones de oscuridad total a 25°C, con humedad relativa del $75 \pm 2\%$. Cuando inició la germinación se cambiaron a fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad.

El medio de cultivo MS estuvo constituido por las sales descritas por Murashige y Skoog (1962), adicionado con mioinositol (100 mg l^{-1}), ácido nicotínico ($0,5 \text{ mg l}^{-1}$), piridoxina HCL ($0,5 \text{ mg l}^{-1}$), tiamina HCL ($0,1 \text{ mg l}^{-1}$), glicina (2 mg l^{-1}) y sacarosa (30 g l^{-1}), antes de agregar el agar agar (7 g l^{-1}) se ajustó el pH a $5,7 \pm 0,1$ empleando el potenciómetro Lab 850 (SI Analytics). Posteriormente se procedió a esterilizar en autoclave (BKM-Z18N, Biobase) a 1,2 Bar de presión y 121°C durante 20 minutos.

2.2 Inducción de callos

De las plántulas germinadas *in vitro* se seleccionaron las dos primeras hojas verdaderas, las cuales fueron segmentadas en explantes de 1 cm y se introdujeron cinco segmentos por medio de cultivo MS, adicionado con mioinositol (100 mg l^{-1}), ácido nicotínico ($0,5 \text{ mg l}^{-1}$), piridoxina HCL ($0,5 \text{ mg l}^{-1}$), tiamina HCL ($0,1 \text{ mg l}^{-1}$), glicina (2 mg l^{-1}) y la auxina 2,4-D en diferentes concentraciones (Tabla 1), seguidamente se ajustó el pH a $5,7 \pm 0,1$ y se agregó agar agar (7 g l^{-1}). Posteriormente se esterilizó en autoclave a 1,2 Bar de presión y 121 °C durante 20 minutos.

Todos los tratamientos se mantuvieron en cámara de crecimiento (Plant Growth Chamber, LGC – 5201 G, LabTech) en condiciones de oscuridad total a 25 °C y con humedad relativa del $75 \pm 2\%$ durante 35 días, con observaciones cada siete días para diferenciar el progreso de inducción.

Tabla 1. Tratamientos para la inducción de callos en hojas de rocoto.

Tratamiento	2,4-D (mg l^{-1})
T1	0
T2	0,25
T3	0,5
T4	0,75
T5	1

2,4-D = Ácido 2,4-diclorofenoxiacético

2.3 Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño fue completamente al azar (DCA) para cinco tratamientos, utilizándose 15 repeticiones por tratamiento; la unidad experimental está constituida por cada segmento de hoja de rocoto. Se evaluó el porcentaje de inducción de callos en hojas de rocoto y el grado de los callos en la escala de Santana (1982) (Tabla 2). Los datos obtenidos se sometieron a Análisis de Varianza (ANVA) y comparación entre las medias con prueba de Tukey ($p \leq 0,05$); ambos análisis se realizaron con el paquete estadístico agrícola del programa R (versión 4.0.3 para Windows).

Tabla 2. Descripción de la escala empleada por Santana (1982).

Grado	Inducción de callos	Observación
0	No formación del callo	-
1	Ligera formación del callo	Débil proliferación en zonas del borde del explante
2	Formación del callo	Proliferación de células por todos los bordes del explante, sin llegar a formar una masa
3	Abundante formación del callo	Formación de una masa voluminosa de callos

3 Resultados

La metodología empleada para la desinfección de semillas de rocoto permitió obtener 100% de semillas libres de contaminación en los medios de cultivo, permitiendo la germinación sin problemas por bacterias u hongos que compitan con la plántula en crecimiento.

La inducción de callos a partir de explantes foliares en rocoto se logró apreciar desde el séptimo día en los tratamientos adicionados con 0,75 y 1 mg

l^{-1} de 2,4-D (T4 y T5, respectivamente) formando callos de grado 1. Los tratamientos adicionados con 0,25 y 0,5 mg l^{-1} de 2,4-D presentaron la formación de callos en las hojas de rocoto en el transcurso de la segunda semana de introducción en los medios de inducción. Transcurrido los 35 días, los medios de cultivo MS adicionados con 0,75 y 1 mg l^{-1} de 2,4-D presentaron los mayores porcentajes de formación de callos con 100% de inducción de callos en hojas de rocoto (Figura 1), presentando diferencias significativas con los demás tratamientos (Figura 2).

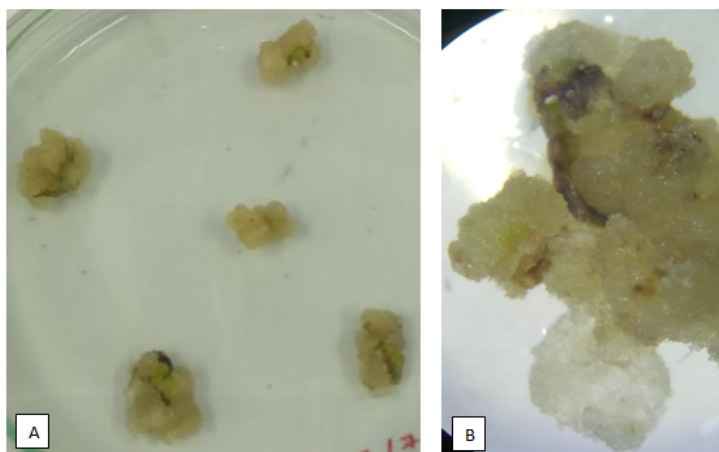


Figura 1. A. Callos a los 35 días formados a partir de hojas de rocoto en medio basal MS con 0,75 mg l^{-1} de 2,4-D. B. Callo inducido a los 35 días con el tratamiento 1 mg l^{-1} de 2,4-D con coloración crema, zonas translúcidas y de consistencia friable.

Los tratamientos con mayores porcentajes de callos de grado 3 fueron los medios de cultivo MS de 0,75 y 1 mg l^{-1} de 2,4-D con 81% y 86%, respectivamente; sin embargo, no hubo diferencias significativas entre ambos tratamientos (Tabla 3). Segui-

dos del tratamiento de 0,5 mg l^{-1} de 2,4-D con 57%, mientras que el tratamiento de 0,25 mg l^{-1} de 2,4-D presentó mayor porcentaje de callos pertenecientes al grado 2.

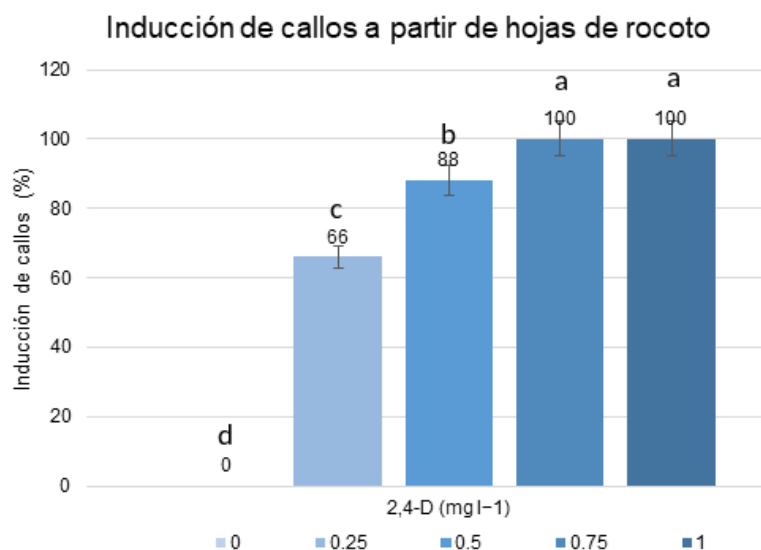


Figura 2. Porcentaje de inducción de callos *in vitro* a partir de hojas de rocoto. Medias con letras distintas difieren significativamente según prueba de Tukey para $p < 0,05$

Tabla 3. Porcentaje de los grados de formación de callos en hojas de rocoto.

Tratamiento	Formación de callos por grado de la escala (%)			
	0	1	2	3
T1	100 a	0 c	0 c	0 d
T2	0 b	18 a	58 a	24 c
T3	0 b	7 b	46 a	57 b
T4	0 b	0 c	19 b	81 a
T5	0 b	0 c	14 b	86 a

Medias con letras distintas difieren significativamente según prueba de Tukey para $p < 0,05$.

Las características morfológicas de los callos fueron de color crema amarillo y en algunos explantes presentaron zonas blanquecinas o translúcidas, y la consistencia de los callos fue friable. Los callos iniciaron su formación en los sitios de corte (bordes) de los explantes, llegando a cubrir por completo la superficie de los explantes en los tratamientos T3 y T4. Por lo que se puede indicar que el rocoto tiene buena respuesta a la inducción de callos, en rápida formación y crecimiento (Figura 3).

4 Discusión

Se logró inducir en los explantes foliares de rocoto la formación de callos *in vitro* con los medios de cultivo MS con presencia de 2,4-D, la apariencia de los

callos fue translúcida y compacta. La inducción de callos a partir de hojas dentro del género *Capsicum* es muy favorable en comparación a otros tipos de explantes (Solís-Ramos y col., 2010; Alva-Guzmán, Cerna-Rebaza y Chico-Ruíz, 2014; Argüelles y col., 2020). Tal como afirma Rodríguez y col. (2014) y Espinosa y col. (2012), la inducción de callos en el caso de las hojas es altamente dependiente del tipo de explante y hormona empleada, y a diferencia de otros explantes, se ve un claro incremento de callos cuando se aumenta la concentración de 2,4-D, además de que este tipo de hormona influye en el aspecto de los callos.

La adición de auxinas y su concentración en el medio de cultivo puede generar un mayor porcentaje de inducción de callos dependiendo de la especie o genotipo empleado, pero la acción de las auxinas está relacionada a la presencia de compuestos presentes en el medio de cultivo que tienen mayor influencia en el desarrollo y diferenciación celular (Feeney y col., 2007; Meiners, Schwab y Szankowski, 2007). Esto debido a que en el cultivo *in vitro* estos compuestos endógenos presentan cambios drásticos en el ambiente celular, lo que genera efecto de estrés que puede causar una reorganización celular y formar una masa de células no diferenciadas (Feher, Pasternak y Dudits, 2003; Shriram, Kumar y Shitole, 2008).

Los callos que se fueron generando en las primeras semanas iniciaron en los bordes de los explantes, y progresaron gradualmente en el explante con el transcurso de los días. En el día 35 los explantes se encontraban cubiertos y hubo un incremento en el tamaño de los callos. Smith (2012), afirma que los callos se generan a partir de la zona de corte de los explantes, zona que está en contacto directo al medio con los reguladores de crecimiento que influyen en una acumulación de auxinas, estimulando una continua división mitótica que genera la formación de tejido calloso poco a poco hasta cubrir el explante en gran parte o por completo.

El efecto de la auxina 2,4-D sobre los explantes foliares de rocoto resultó en la inducción de callos, lo que podría estar relacionado a las acciones fisiológicas que se activan en el explante por medio de la auxina exógena adicionada en el medio de cultivo. Taiz y Zeiger (1998), determinaron que la inducción se expresa por medio de genes que codifican factores proteicos mediante la unión de las auxinas a receptores externos e internos. Azcón-Bieto (2008), descubrieron que los factores proteicos permiten el aumento de la plasticidad y ablandamiento de la pared celular, resultando en la dilatación de la célula por presión de turgencia, incrementando de tamaño hasta que la pared celular opone re-

sistencia. Pero también la inducción de callos está influenciada por enzimas que activan o reprimen la transcripción de genes que median las acciones fisiológicas de las citoquininas; estas enzimas son las histidinas fosfotransferasas, las cuales son activadas por la unión de las citoquininas a receptores tipo histidina quininas (Müller y Sheen, 2007).

La formación de los callos de rocoto en la primera semana puede ser un hallazgo de importancia porque brinda información de ser una especie de rápido efecto de inducción. Los resultados obtenidos fueron superiores en comparación con los obtenidos por Alva-Guzmán, Cerna-Rebaza y Chico-Ruiz (2014), quienes generaron callos en *Capsicum chinensis* a partir del décimo día de introducción del explante al medio de inducción, empleando 0,5 y 1 mg l⁻¹ de 2,4-D.

Se resalta la importancia de la auxina 2,4-D, por ser la principal fitohormona empleada en condiciones *in vitro* para la inducción de callos, existiendo un gran número de reportes de su adición en los medios de cultivo, tanto para especies del mismo género que el rocoto como para otros géneros (Larson, Gómez y Ríos, 2006; Terra y col., 2009; Hernández y Díaz, 2019; Hernández y col., 2020).

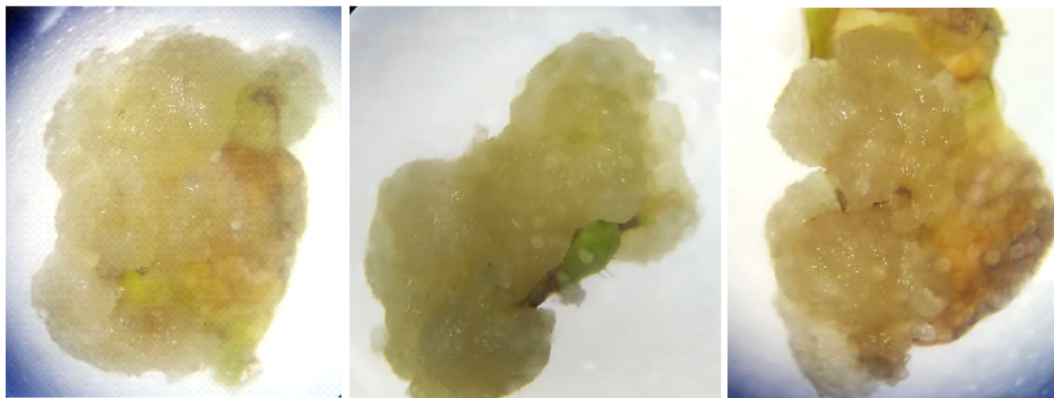


Figura 3. Callos obtenidos en explantes foliares de rocoto, inducidos en medio de cultivo MS con 2,4-D (0,75 mg l⁻¹).

También se debe tener en cuenta la edad de los explantes empleados, siendo las primeras hojas verdaderas de rocoto las que influenciaron en el estudio al presentar un mayor potencial de inducción,

tal como afirman Alleweldt y Radler (1962), al indicar que la edad fisiológica de los explantes es inversamente proporcional a su potencial organogénico.

Estos resultados suponen un avance importante en la aplicación de técnicas biotecnológicas en programas de mejoramiento genético de rocoto, presentándose de manera favorable para el potencial uso de callos de esta especie en cultivos celulares para la obtención de metabolitos secundarios de interés farmacológico. De igual forma, es una base para futuras investigaciones en inducción de embriogénesis somática indirecta, organogénesis indirecta, rizogénesis, aislamiento de protoplastos, entre otros.

5 Conclusiones

Se desarrollo una metodología para la inducción *in vitro* de callos a partir de hojas en rocoto, obteniendo el mayor porcentaje de inducción y formación de callos en grado 3, empleando un medio de cultivo MS adicionado con 0,75 y 1 mg l⁻¹ de 2,4-D.

Referencias

- Alayón, P. y col. (2006.). «Obtención de callos por cultivo in vitro de pulpa de manzana cv'Anna': Detección de actividad de Alfa-L-arabinofuranosidasa». Tesis de mtría. Universidad Nacional del NORDESTE. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Resumen: A-044.
- Alleweldt, G. y F. Radler (1962). «Interrelationships between photoperiodic behavior of grapes & growth of plant tissue cultures». En: *Plant physiology* 37.3, 376-379. Online:https://bit.ly/3jkvsaH.
- Alva-Guzmán, B., L. Cerna-Rebaza y J. Chico-Ruíz (2014). «Inducción de embriones somáticos a partir de hojas Capsicum chinensis utilizando diferentes concentraciones de 2, 4 Diclorofenoxiacético y 6 Bencilaminopurina». En: *Scéndo* 16.2. Online:https://bit.ly/2MHonCh.
- Argüelles, A. y col. (2020). «Callogénesis in vitro de paprika (Capsicum annuum L.) cv. Papri King a partir de tallos». En: *Big Bang Faustiniiano* 9.1, 4-7. Online:https://bit.ly/3nQdy0y.
- Azcón-Bieto J. y Talon, M. (2008). *Fisiología y Bioquímica Vegetal*. 2da Ed. Madrid: Hill - Interamericana.
- Caballero, B., C. Márquez y B. Rojano (2017). «Efecto de la liofilización sobre las propiedades funcionales del ají rocoto (Capsicum pubescens)». En: *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica* 20.1, 111-119. Online:https://bit.ly/2V5qwZI.
- Espinosa, A. y col. (2012). «Efecto del tipo de explante y la concentración de ácido 2, 4-diclorofenoxiacético en la formación de callos en Morus alba L.» En: *Pastos y Forrajes* 35.4, 407-416. Online:https://bit.ly/3oQXStG.
- Feeney, M. y col. (2007). «Shoot regeneration from organogenic callus of sweet cherry (Prunus avium L.)» En: *Plant cell, tissue and organ culture* 90.2, 201-214. Online:https://bit.ly/3cKuUcT.
- Feher, A., T. Pasternak y D. Dudits (2003). «Transition of somatic plant cells to an embryogenic state». En: *Plant cell, tissue and organ culture* 74.3, 201-228. Online:https://bit.ly/2Od2ZrJ.
- Gómez, L. (2016). «Establecimiento de un protocolo para la inducción de la androgénesis en Capsicum chinense Jacq.» Tesis de Maestría. Mérida, Yucatán, México. Online:https://bit.ly/2Pd2vjO: Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Gutierrez-Rosati, A. y B. Vega (2017). «Micropropagación in vitro de "ají mirasol", Capsicum baccatum var. Pendulum». En: *The biologist* 14.2, 171-181. Online:https://bit.ly/3pPkUcT.
- Hernández, A. y H. Díaz (2019). «Inducción in vitro de callo embriogénico a partir del cultivo de anteras en "papa amarilla" Solanum goniocalyx Juz. & Bukasov (Solanaceae)». En: *Arnaldoa* 26.1, 277-286. Online:https://bit.ly/2YPyNFj.
- Hernández, A., A. Pineda y H. Díaz (2019). «Efecto de la luz y del ácido giberélico en la germinación in vitro de Capsicum annuum L. cv. "Papri King".» En: *Biotecnología Vegetal* 19.3, 165-170. Online: https://bit.ly/3ez5U5W.
- Hernández, A., A. Pineda y H. Noriega (2019). «Aislamiento e identificación de Fusarium oxysporum obtenidos de zonas productoras de "ají paprika" Capsicum annum L.(Solanaceae) en el distrito de Barranca, Perú». En: *Arnaldoa* 26.2, 689-698. Online:https://bit.ly/2YOy9HR.
- Hernández, A. y col. (2020). «Efecto de la concentración de 2,4-diclorofenoxiactico en la inducción de callos in vitro utilizando cotiledones de rocoto (Capsicum pubescens Ruiz & Pav.)» En: *The Biologist* 17.2, 327-334. Online:https://bit.ly/3kXv5BM.

- Izquierdo, H., L. Alcaraz y M. Rodríguez-Álvarez (2017). «Micropropagación de chiltepín (*Capsicum annuum* L. cv. 'glabriusculum') mediante el empleo de una oligosacarina de origen péctico». En: *Acta universitaria* 27.5, 34-43. Online:https://bit.ly/2p9bTde.
- Larson, C., M. Gómez C. and Sánchez y D. Ríos (2006). «Inducción de caulogénesis indirecta en *Eucalyptus globulus*». En: *Bosque* 27.3, 250-257. Online:https://bit.ly/3jriGXJ.
- Levitus, G. y col. (2010). «Biotecnología y Mejoramiento Vegetal II». Tesis de mtría. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Lucana, C. (2012). «Respuesta de 5 especies de *Capsicum* spp. A *Phytophthora capsici* Leon, bajo condiciones de invernadero, en los laboratorios de fitopatología de la UNALM – Lima». Tesis de Ingeniera. Cusco. Perú. Online:https://bit.ly/31J3taa: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Marín, E. (2012). «Embriogénesis somática del género *Capsicum*: Validación de un protocolo de regeneración in vitro en *Capsicum annuum*». Tesis de Maestría. Mérida, Yucatán, México. Online:https://bit.ly/2BHB7Ck: Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Meiners, J., M. Schwab e I. Szankowski (2007). «Efficient in vitro regeneration systems for *Vaccinium* species». En: *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 89.2, 169-176. Online:https://bit.ly/3cKCST3.
- Müller, B. y J. Sheen (2007). «Advances in cytokinin signaling». En: *Science* 318.5847, 68-69. Online:https://bit.ly/3jutEvO.
- Murashige, T. y F. Skoog (1962). «A revised medium for rapid growth and bio assays with tohaco tissue cultures». En: *Physiology Plant* 15.3, 473-497. Online:https://bit.ly/2MK33w2.
- Orlinska, M. y P. Nowaczyk (2015). «In vitro plant regeneration of 4 *Capsicum* spp. genotypes using different explant types». En: *Turkish Journal of Biology* 39.1, 60-68. Online:https://bit.ly/2MD8AHm.
- Pérez, M. y col. (2009). «Expresión transitoria GUS en callos de arroz (var. J-104) mediante la optimización de las condiciones de cultivo in vitro». En: *Rev. Colomb. Biotecnol.* 9.2, 75-84. Online:https://bit.ly/2MlrERD.
- Rashmi, R. y M. Trivedi (2014). «Effect of various growth hormone concentration and combination on callus induction, nature of callus and callogenic response of *Nerium odorum*». En: *Applied biochemistry and biotechnology* 172.5, 2562-2570. Online:https://bit.ly/3cPoAkb.
- Robledo, A. y G. Carrillo (2004). «Regeneración in vitro de plantas de Chile (*Capsicum annuum* L.) mediante cultivo de cotiledones e hipocótilos». En: *Revista Fitotecnica Mexicana* 27.2, 121-126. Online:https://bit.ly/2pPgu4w.
- Rodríguez, M. y col. (2014). «Inducción in vitro de callogénesis y organogénesis indirecta a partir de explantes de cotiledón, hipocótilo y hoja en *Ugni molinae*». En: *Bosque* 35.1, 111-118. Online:https://bit.ly/2WdJDCD.
- Sala, F. y M. Labra (2003). «Encyclopedia Appl. Plant Sci.» En: ed. por B. Thomas, D. Murphy y B. Murray. Oxford, UK: Academic Press Elsevier. Cap. Somaclonal variation, págs. 1417-1422.
- Sanatombi, K. y G. Sharma (2007). «Micropropagation of *Capsicum annuum* L.». En: *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 35.1, 57-64. Online:https://bit.ly/3cJKYeT.
- Santana, N. (1982). «Determinación de un medio adecuado para la obtención de callus en variedades de caña de azúcar (*Saccharum species*) in vitro.» En: *Cultivos Tropicales* 4.3, 48-52. Online:https://bit.ly/3jmosdf.
- Sardón, E. (2015). «Fortalecimiento de la cadena de valor del rocoto fresco (*Capsicum pubescens*) de la selva central para el mercado de Lima». Tesis de Maestría. Lima, Perú. Online:https://bit.ly/3gFCJ2Y: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Shriram, V., V. Kumar y M. Shitole (2008). «Indirect organogenesis and plant regeneration in *Helicteres isora* L., an important medicinal plant». En: *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant* 44.3, 186-193. Online:https://bit.ly/31Go4vL.
- Smith, R. (2012). *Plant tissue culture: techniques and experiments*. Londres, UK. Online:https://bit.ly/2qyukbU: Academic Press Elsevier.
- Solís-Ramos, L. y col. (2010). «Indirect somatic embryogenesis and morphohistological analysis in *Capsicum chinense*». En: *Biologia* 65.3, 504-511. Online:https://bit.ly/2MBI80E.
- Taiz, L y E Zeiger (1998). *Plant Physiology*. 2nd. Sunderland, Massachusetts. Online:Online: https://bit.ly/35XfUTb: Sinauer Associates, Inc.
- Terra, E. y col. (2009). «Controle da calogênese do paubrasil in vitro». En: *Revista Árvore* 33.6, 987-996. Online:https://bit.ly/2YSqBnD.

- Valdez, I. (2017). «Caracterización fenotípica de quince accesiones de germoplasma de rocoto (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pavón.) en la estación INIA Santa Rita Arequipa». Tesis de Ingeniera. Arequipa Perú. Online:<https://bit.ly/362Wo7K>: Universidad Nacional de San Agustín,
- Vélez, M. y col. (2010). «Obtención de plantas haploides en chile miahuateco (*Capsicum annuum* L.)» En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 1.2, 189-201. Online:<https://bit.ly/3q6MoDO>.
- Venkataiah, P. y col. (2016). «Somatic embryogenesis and plant regeneration of *Capsicum baccatum* L.» En: *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology* 14.1, 55-60. Online:<https://bit.ly/2JjhZyR>.



ANÁLISIS SISTÉMICO DE LA SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA DE UNIDADES DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA FAMILIAR EN UNA COMUNIDAD CAMPESINA DE LEBRIJA, COLOMBIA

SYSTEMIC ANALYSIS OF THE ECONOMIC SUSTAINABILITY OF FAMILY AGRICULTURAL PRODUCTION UNITS IN A PEASANT COMMUNITY OF LEBRIJA, COLOMBIA

Martha Lenis Castro-Castro^{id}, Albeiro Beltrán-Díaz^{id} y Adolfo Vargas-Espítia^{id}

Corporación Universidad de Investigación y Desarrollo -UDI, Calle 9 23 55, Bucaramanga, Santander, Colombia.

*Autor para correspondencia: abeltran2@udi.edu.co

Manuscrito recibido el 21 de septiembre de 2020. Aceptado, tras revisión, el 15 de marzo de 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021.

Resumen

La complejidad de los problemas actuales del campo colombiano pone en riesgo la sostenibilidad de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) familiares. En consecuencia, se convierte en un área de estudio fundamental para el mejoramiento de la economía rural. Debido a ello, se desarrolló una investigación documental y de campo sobre un caso de estudio ubicado en Lebrija, Colombia, para el análisis sistémico de la sostenibilidad económica en 10 UPAS promotoras de la agricultura sostenible. Los resultados permitieron establecer la efectividad del ES en la caracterización de UPAs. Se identificó que la falta de inversión en infraestructura y tecnologías apropiadas han hecho que las UPAs destinen más del 50% de su área total para el inadecuado pastoreo de bovinos. Esta distribución de la tierra amenaza la sostenibilidad de la economía de las familias locales, dado que la producción y rentabilidad de la ganadería no son suficientes para su sustento y el mantenimiento de los potreros. El inadecuado pastoreo genera grandes cantidades de estiércol que contamina el medio ambiente. Lo anterior afecta la congruencia entre las actividades productivas y los principios filosóficos de las UPAs.

Palabras clave: Desarrollo rural, enfoque sistémico, excedentes orgánicos, sostenibilidad económica, compost.

Abstract

The complexity of the current problems in the Colombian countryside puts at risk the sustainability of family Agricultural Production Units (UPA for its acronym in Spanish). Consequently, it becomes a fundamental study area for the improvement of the rural economy. For this reason, a documentary, field investigation was developed on a case study located in Lebrija, Colombia, for the systemic analysis of economic sustainability in 10 UPAS promoters of

sustainable agriculture. The results allowed to establish the effectiveness of the ES in the Characterization of UPAs. It was identified that the lack of investment in infrastructure and appropriate technologies has made the UPAs to allocate 50% of its total area for inadequate grazing. This distribution of land threatens the sustainability of the economy of local families, given that the production and profitability of livestock are not enough for their livelihood and the maintenance of pastures. The inadequate grazing generates large amounts of manure that pollutes the environment. The above affects the congruence between the productive activities and the philosophical principles of the UPAs.

Keywords: Rural development, systemic approach, organic surpluses, economic sustainability, compost.

Forma sugerida de citar: Castro-Castro, M., Beltrán-Díaz, A. y Vargas-Espítia, A. (2021). Análisis sistémico de la sostenibilidad económica de unidades de producción agropecuaria familiar en una comunidad campesina de Lebrija, Colombia. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 34(2):141-153. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.10>.

IDs Orcid:

Martha Lenis Castro-Castro: <http://orcid.org/000-0001-7897-1040>

Albeiro Beltrán-Díaz: <http://orcid.org/0000-0002-1585-0708>

Adolfo Vargas-Espítia: <http://orcid.org/0000-0003-4741-4991>

1 Introducción

Las fincas de la vereda la cuchilla del municipio de Lebrija Santander representan un conjunto de Unidades de Producción Agropecuaria (UPAs) familiares, vinculadas a una asociación de mujeres campesinas llamada AMMUCALE (Díaz, Ortiz y Rodríguez, 2011). Sus propietarias promueven principios de protección del agua, los bosques, los saberes ancestrales, las semillas nativas y la soberanía alimentaria, en estrecha relación con los principios del biocentrismo, las economías alternativas (trueque) y la vida sencilla que expresan los Objetivos del Buen Vivir - OBV (Cubillo e Hidalgo, 2019; Huanaconi, 2010). Si bien son un ejemplo local de agricultura responsable alineada con algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS (ONU, 2015) según diferentes estudios (Díaz, Ortiz y Rodríguez, 2011; Amaya, Mendez y Hernández, 2018; Cruz y col., 2018), sufren parte de los problemas del sector rural colombiano, circunstancia que las ha convertido como caso de estudio.

La distribución y posesión de la tierra demuestra que el 70% de las UPAs colombianas poseen menos de 5 ha (DANE, 2015). Esta atomización limita la capacidad de producción de las fincas (Kalmanovitz y López, 2003). Del mismo modo, temas como la inversión en maquinaria, infraestructura, sistemas de riego y asistencia técnica se mantienen por debajo del 15% (DANE, 2015), mientras que el uso de fertilizantes artificiales es 2,83 veces mayor al promedio suramericano (Banco Mundial, 2019a). Esto dificulta a los campesinos a mantener estables sus costos de producción y pone en riesgo su sostenibilidad económica.

Si bien, desde los años 50 se han intentado mejorar las condiciones del agro mediante los planes de desarrollo (Kalmanovitz y López, 2003); los resultados han demostrado un aumento en la brecha de desigualdad entre el campo y la ciudad con un Gini (Banco Mundial, 2019b) del 0,45 (DANE, 2019). Algunas investigaciones (Arias, Mader y Escobar, 2008; Ruiz y Oregui, 2001), exponen que una de las razones principales es que tradicionalmente se ha observado el agro desde un enfoque reduccionista, lo que resulta en una visión parcial de los problemas. En respuesta, algunos autores (Bistagnino, 2011; Capra, 1996; Meadows, 2008; Rovalletti, 1989) señalan la necesidad de cambiar a un enfoque sistémico - ES para el análisis de situaciones complejas,

en donde diferentes investigaciones aplicadas han validado el ES para el diseño de modelos de toma de decisiones (Stamberg, 2015) y de producción sostenible (Barbero y Toso, 2006).

De acuerdo a lo anterior, el objetivo principal del estudio es realizar un análisis sistémico de la sostenibilidad económica en 10 UPAs promotoras de la agricultura sostenible. Para ello se proponen los objetivos específicos: (1) realizar un análisis sistémico de las UPAs en relación con el territorio basado en la metodología *Sistemic Desing* de Bistagnino (2009), (2) efectuar una revisión detallada de los resultados económicos en materia de producción y rentabilidad y (3) identificar las problemáticas sistémicas y sus posibles oportunidades de mejora.

2 Materiales y Métodos

El levantamiento de información a través de fuentes primarias y secundarias, el análisis sistémico e interpretación de los datos se realizó entre mayo y diciembre del año 2019 a partir de un estudio de caso, aplicando un análisis cualitativo y cuantitativo.

2.1 Caso de estudio

El área de estudio se encuentra en zona rural del municipio de Lebrija - Santander, nororiente de Colombia. En esta región el 80% de sus habitantes deriva sus ingresos de actividades agropecuarias, principalmente en cultivos de piña, limón Tahití y cacao. El 84,27% de las UPA poseen menos de 20 ha (Alcaldía de Lebrija, 2016); tal como se observa en la Figura 1. Las fincas del territorio poseen en promedio 20 ha, cuyas actividades productivas giran en torno al cultivo de cítricos, vegetales, cacao y al pastoreo de ganado.

Para la selección del caso de estudio se usaron criterios tales como: la extensión del predio, tipos de cultivos, actividades pecuarias, ubicación y orientación hacia la sostenibilidad. Se seleccionaron 10 UPAs ubicadas en la vereda la cuchilla, encabezadas por la finca "Tierra Buena". Sus administradoras son mujeres quienes son cabeza de familia pertenecientes a AMMUCALE, las cuales cumplen con las características necesarias para servir como una muestra representativa de la asociación.

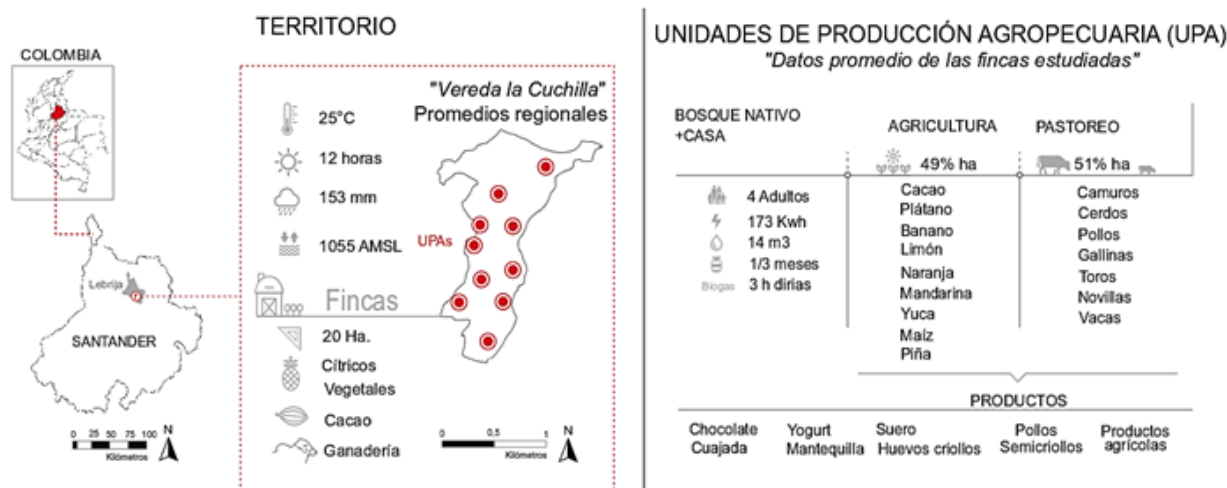


Figura 1. Promedios del territorio y UPAs caso de estudio basado en los datos de la Alcaldía de Lebrija (2016).

En esta zona, las UPAs seleccionadas desarrollan procesos productivos que agregan valor sus productos. El 100% del cacao es transformado en chocolate y las heces porcinas son aprovechadas para la generación de gas a partir de biodigestores. Sus ingresos se encuentran diversificados mediante 5 actividades pecuarias y 8 agrícolas, comercializadas bajo prácticas de comercio justo (Díaz, Ortiz y Rodríguez, 2011; Amaya, Mendez y Hernández, 2018; Cruz y col., 2018). Adicionalmente, la finca Tierra Buena lidera los procesos agroecológicos de la vereda, dada su antigüedad dentro de AMMUCALE y la visión humana de su propietaria.

2.2 Método

2.2.1 Análisis sistémico

Se aplicó el ES según la metodología sugerida por Bistagnino (2011), la cual consiste en el análisis del territorio, los actores y los sistemas a nivel macro, meso y micro (Ceschin, 2014), buscando identificar y caracterizar en términos cuantitativos y cualitativos las entradas, procesos, salidas, las problemáticas económicas (Barbero y Toso, 2006; Bertalanffy, 1968; Bistagnino, 2011; Capra, 1996; Carrá, 1961; Garciandía, 2011; Johansen, 1993; Meadows, 2008; Stamberg, 2015; Rovalletti, 1989) y los puntos de apalancamiento (Meadows, 1997) para el mejoramiento de la sostenibilidad según James (2015).

En la primera etapa se realizó el análisis del te-

ritorio mediante la revisión de fuentes secundarias (artículos, libros, literatura gris, sitios web oficiales) para obtener datos sobre las características culturales, geográficas y productivas del agro lebrijense.

En la segunda etapa, el análisis de los actores se realizó usando como instrumento de recolección de información una entrevista semiestructurada, la cual fue aplicada a 42 personas involucradas directamente en las actividades agropecuarias del caso de estudio, como sus propietarias, sus hijos y sus cónyuges. Las categorías de análisis corresponden a la dimensión económica de la sostenibilidad basado en James (2015), la producción agropecuaria, la economía familiar y los procesos de transformación de las materias primas.

En la tercera y última etapa, para la caracterización de los subsistemas se usó como instrumento la observación y como herramienta para la estructuración y comprensión de los datos el mapa de sistemas (Vargas y col., 2020; Vezzoli y col., 2014). Finalmente, debido a la heterogeneidad de la información recopilada con el ES se entrevistaron a tres expertos en producción responsable, etnobiología y comercio justo, quienes aportaron su interpretación sobre los resultados del caso de estudio relacionados con agroecología, tejido social y comercio agrícola informal.

2.2.2 Análisis de dimensión económica de la sostenibilidad.

Para el análisis de la dimensión económica se adaptó el *Profile Questionnaire* diseñado por (James, 2015), el cual consta de 49 preguntas, distribuidas equitativamente sobre siete temas relacionados con: 1) producción y dotación de recursos, 2) intercambio y transferencia, 3) contabilidad y regulación, 4) consumo y uso, 5) trabajo y bienestar, 6) tecnología e infraestructura, 7) riqueza y distribución. La entrevista fue aplicada a las propietarias de las fincas, sus cónyuges y sus hijos mayores de edad, para un total de 42 personas. Las opciones de respuesta buscaron comprender la percepción de los entrevistados sobre cada uno de los siete temas expuestos, quienes en cada pregunta escogieron una única respuesta entre crítico, malo, muy insatisfecho, insatisfecho, básico, satisfactorio, muy satisfactorio, bueno y excelente, las cuales fueron tabuladas en una tabla de Excel y asignadas a un valor de 1 a 9, donde 1 corresponde a crítico y 9 a excelente. Se promediaron las respuestas con el fin de obtener la percepción por cada una de las 49 preguntas. Posteriormente, se calculó el promedio de satisfacción para cada uno de los siete temas abordados. Finalmente, se calculó la percepción general de los encuestados sobre la sostenibilidad económica de sus familias. Los resultados fueron plasmados gráficamente para observar los niveles de los siete temas.

2.2.3 Análisis de rentabilidad del eje económico.

Se aplicó un enfoque cuantitativo centrado en el valor económico de los bienes producidos en las UPAs. Para ello, se recolectó información sobre la producción de los microsistemas en función del dinero, y se registró en tablas de cálculo. La capacidad económica se evaluó mediante el valor agregado neto (VAN) (Stamberg, 2015), el cual se halló mediante la fórmula (1).

$$VAN = PB - CI - D \quad (1)$$

Donde PB es la producción bruta de las UPAs en pesos colombianos; CI es el consumo intermedio o el costo de los insumos adquiridos; D es la suma de la depreciación de las máquinas, equipos e instalaciones utilizadas en la producción de bienes y servicios.

Adicionalmente, se halló la rentabilidad agropecuaria RA que permite conocer el rendimiento del

negocio después de pagar salarios (S), intereses bancarios (J), arrendamientos (T) e impuestos (I) (Stamberg, 2015), por lo que permite obtener una visión realista sobre los beneficios finales percibidos por las familias. Para el cálculo de la RA, se aplicó la fórmula de Stamberg (2015) (2).

$$RA = VAN - S - J - T - I \quad (2)$$

Las formulas fueron aplicadas de acuerdo a las dos actividades desarrollada en las UPAs. La primera abarca todas las actividades de tipo agrícola; la segunda incluye únicamente la actividad ganadera. Los datos fueron tabulados y analizados en Excel, en donde se desarrolló un análisis descriptivo de las variables, se aplicaron las formulas y se obtuvieron totales promedio por tipo de actividad.

3 Resultados

3.1 Problemas identificados mediante el ES

Mediante el uso del ES en las observaciones de campo se detalló a nivel micro la forma en que fluyen los recursos a través de los sistemas productivos de las UPAs; esto permitió identificar cinco problemas comunes en las fincas estudiadas, tres de ellos relacionados con las entradas, uno en los procesos y uno más en las salidas, situaciones que se configuran en una amenaza para la consecución de una zona rural sostenible (Figura 2).

En las entradas se hallaron tres situaciones cuyos impactos resultan ser negativos para la sostenibilidad de las fincas estudiadas. La primera de ellas se refiere a la falta fertilizantes. Si bien las propietarias promueven el rechazo a los agroquímicos, no se evidenció el uso de abonos orgánicos, lo que en el largo plazo podría generar dificultades en la producción agrícola por la disminución de nutrientes en el suelo. La segunda se relaciona con la baja rentabilidad de las fincas, dado que el ingreso económico no es suficiente para cubrir los costos y las necesidades familiares. La tercera se refiere a los ingresos ajenos a la producción agropecuaria. En 8 de las 10 UPAs estudiadas, la mayor parte del ingreso económico proviene de empleos urbanos de los cónyuges e hijos. Esto último es beneficioso para la economía del hogar, pero a largo plazo podría desplazar a estas familias hacia las zonas urbanas en busca de mejores oportunidades.

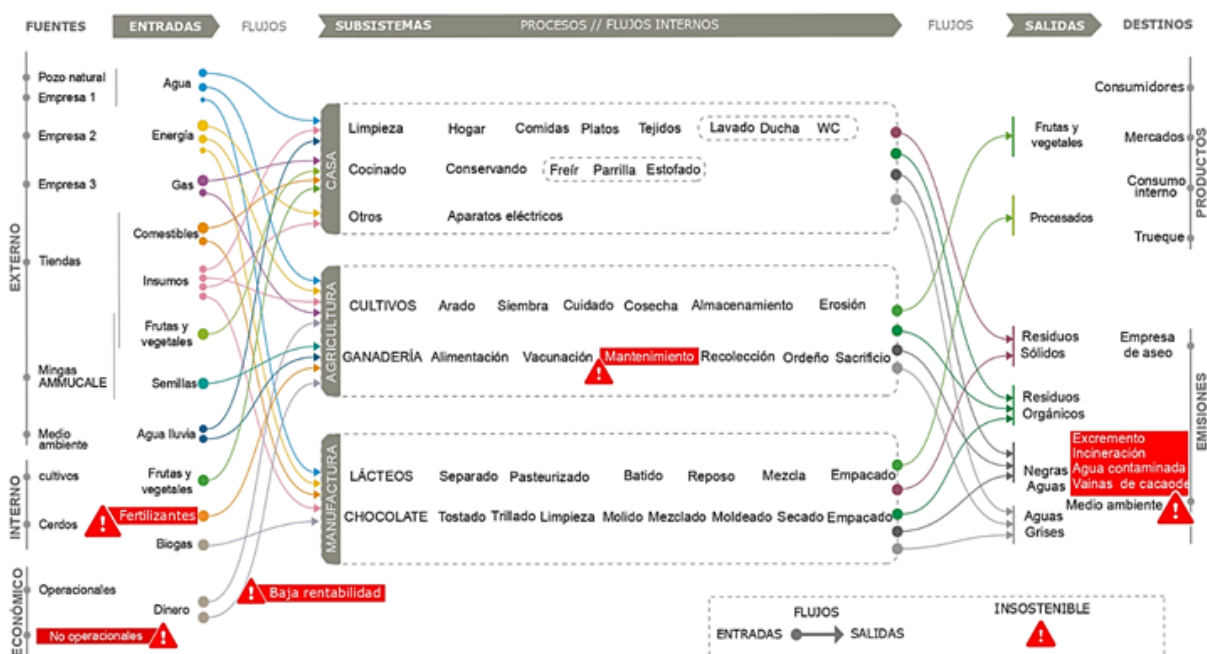


Figura 2. Análisis a partir del Mapa del sistema actual de la UPA. Los símbolos de alerta reflejan problemas identificados en relación a la sostenibilidad.

En los procesos se identificaron problemáticas relacionadas con el mantenimiento de las UPAs, específicamente en las zonas de potrero. Se evidenció que en 7 de las 10 UPAs estudiadas, el uso del suelo exclusivo para el pastoreo de bovinos es mayor al 50%; sin embargo, la producción lechera y la venta de ejemplares no generan los ingresos suficientes para cubrir los costos de mantenimiento asociados con la restauración de postes, cercas, el pago de impuestos, vacunas, alimentación, entre otros. Aunque la vereda la cuchilla es una zona que tradicionalmente combina actividades agrícolas con ganadería, se evidenció que en las fincas estudiadas la cantidad de ejemplares corresponde en promedio a 1 res por cada 1,5 ha.

En las salidas se evidenció una problemática relacionada con los excedentes orgánicos y el medio ambiente. A partir de las observaciones de campo se logró identificar que el estiércol del ganado, las vainas del cacao, las aguas residuales del hogar y algunas basuras reciben una inadecuada disposición, y como resultado terminan convirtiéndose en un foco de contaminación ambiental. En el caso del estiércol del ganado, se logró identificar que en

las fincas estudiadas se generan aproximadamente 219,55 t de estiércol septimestralmente, las cuales son dispersas por los animales sobre los potreros y no reciben ningún tipo de manejo. Del mismo modo, durante los meses de medición de excedentes, se identificó que en las fincas estudiadas, la producción de cacao generó 53,9 t de vainas, las cuales se acumularon en montones dentro del cultivo y, al igual que el estiércol, no recibieron ningún manejo adecuado.

De igual manera, se identificó que las aguas residuales de los hogares son vertidas al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento de descontaminación, cuya cifra se desconoce debido a la falta de acueducto, contadores y alcantarillado en la zona, pero a partir del promedio colombiano de consumo por familia (EPM, 2020) se estima podría aproximarse a los 115,5 metros cúbicos mensuales por hogar. Finalmente, se evidenció que los excedentes inorgánicos como bolsas plásticas, envolturas de alimentos, papel higiénico entre otros, son incinerados por algunas familias, debido a que el servicio de recolección de basuras no presta sus servicios en zonas rurales; por lo que no fue posible estimar el

nivel de contaminación que esta práctica genera, sin embargo, se consideró como un foco de contaminación relevante para mencionar en los resultados del ES.

3.2 Análisis de la Sostenibilidad económica de las UPAs

Gracias a la aplicación de la adaptación del Profile Questionnaire de James (2015), se identificó que la percepción de las familias hacia los temas abordados deja al eje económico de la sostenibilidad en un nivel general básico. Sin embargo, al observar ca-

da una de sus aristas de forma particular, es posible observar que algunos de los temas que componen a esta dimensión se encuentran en niveles más bajos. Como se aprecia en la Figura 3, una de las principales falencias que poseen las UPAs estudiadas y que se encuentra en un nivel malo es su falta de estrategias contables y regulación, tema que, según los entrevistados, dificulta la posibilidad de conocer la forma en que fluye el dinero dentro de la economía familiar y la transparencia en el cómo se usa. Así mismo, este desconocimiento contable impide que las familias puedan diseñar planes a mediano y largo plazo, limitándolos a una explotación económica cortoplacista.



Figura 3. Perfil de la sostenibilidad económica de las UPAs, adaptado de (James, 2015).

Por su parte, la arista de tecnología e infraestructura posee un nivel muy insatisfactorio, principalmente por la falta de dotación y disposición de estas herramientas y una debida adecuación de la infraestructura actual enfocada hacia el desarrollo sostenible; es decir, los campesinos encuestados consideran que no les ha sido posible acceder a nueva tecnología ni mejorar la que poseen actualmente.

Así mismo, según los resultados de la entrevista, las aristas 7 y 2 relacionadas con la riqueza y los intercambios se ubicaron en el nivel insatisfactorio. Esto implica una informalidad por parte de los habitantes de la zona sobre las oportunidades de comercio a su disposición y la retribución de la riqueza.

Finalmente, las aristas 1, 4 y 5 relacionadas con la producción, el consumo y el empleo se posicionaron entre los niveles básico y muy satisfactorio. Esto significa que los entrevistados tienen una percepción entre normal y positiva sobre estos tres temas, principalmente por la labor que sus propietarias han desarrollado con AMMUCALE desde hace más de 20 años y que ha promovido la diversificación de la producción, el consumo responsable y el compromiso de los jóvenes con el campo.

3.3 Rentabilidad de las UPAs

Como parte de la comprensión de la dimensión económica de la sostenibilidad, se realizó el cálculo del

valor agregado neto y la rentabilidad agropecuaria de cada una de las UPAs estudiadas. Como se puede observar en la Figura 4, los resultados permitie-

ron identificar las actividades más y menos productivas, así como el beneficio generado de acuerdo al espacio requerido por cada una de ellas.

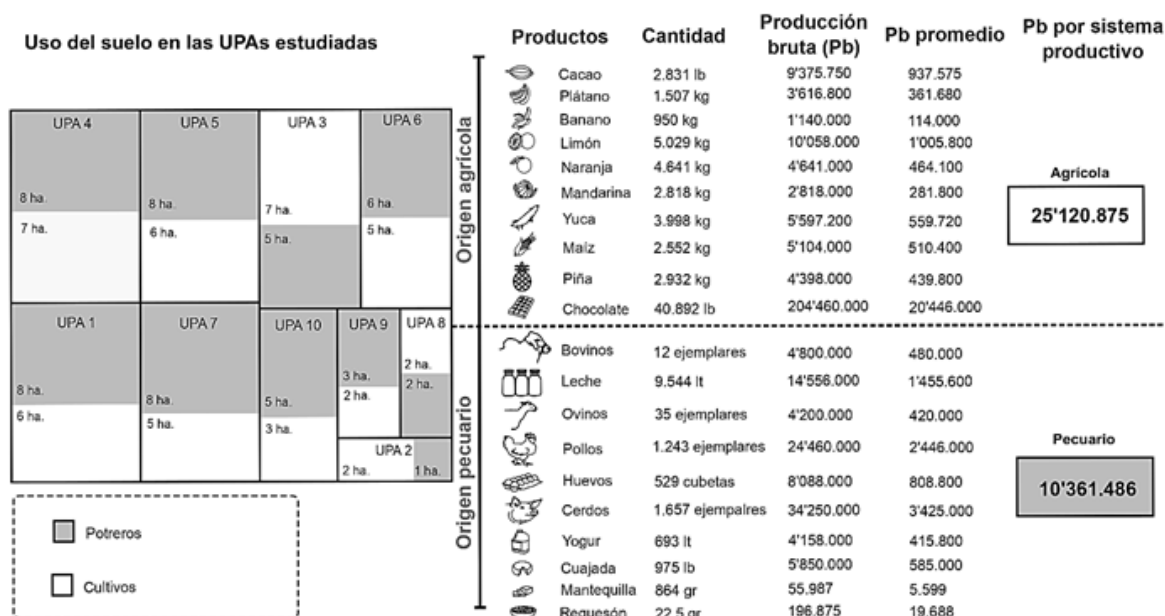


Figura 4. Uso de suelo y producción bruta (Pb) de las UPAs estudiadas

Aunque el municipio de Lebrija no es una zona ganadera, en las UPAs estudiadas se usa cerca del 56% del suelo como potrero, en el cual se mantienen pocos ejemplares por hectárea. La venta de ganado no es la actividad económica más representativa, ya que los bovinos son usados principalmente para la producción de leche y derivados como yogur, cuajada, mantequilla y requesón; el ganado es visto como una fuente de ahorro de capital. En la figura 4 se puede apreciar que la actividad pecuaria que más genera ingresos es la cría de cerdos, seguida por la venta de pollo criollo y la comercialización de leche; la ganadería por su parte genera un ingreso promedio de \$480.000 por UPA al año, ocupando el sexto puesto en las actividades pecuarias y el onceavo a nivel general.

En esta zona se han impulsado proyectos de manufactura que buscan agregar valor a las materias primas, como en el caso del chocolate y los derivados de la leche. En este aspecto, la elaboración de chocolate de mesa es la actividad que más aporta a

la economía familiar, razón por la cual la mayor parte del cacao es transformado y solo cerca de 2.831 lb son vendidas en grano.

A pesar que la producción por actividad y el uso de suelo permiten comprender algunos aspectos de la economía local, no reflejan por completo la realidad de los hogares. En la Tabla 1 se muestra de manera consolidada los resultados en materia de rentabilidad (RA), donde después de restar los costos asociados a cada sistema productivo, se identificó cuánto dinero realmente reciben en promedio las UPAs y cuánto es el aporte por hectárea de acuerdo a su uso.

Los resultados que muestra la Tabla 1 corresponden a los valores promedio de las 10 UPAs. Como se puede apreciar, las actividades derivadas de la producción agrícola presentan un VAN promedio de \$19'988.115 y una RA de \$13'146.944, los cuales se traducen en una rentabilidad por hectárea de \$4'537.427. Sin embargo, las actividades pecuarias,

dentro de las cuales se encuentra la ganadería y sus derivados, presentan en promedio una rentabilidad por hectárea de \$497.365.

En 8 de las 10 Upas estudiadas, el área usada como potreros fue mayor que el área usada para cul-

tivos agrícolas. A pesar de disponer de un mayor espacio, el beneficio económico recibido por la unidad familiar como resultado de las actividades pecuarias llega a \$3'098.579 de pesos al año, mucho menor que la generada por las actividades agrícolas.

Tabla 1. VA y RA promedio de las UPAs estudiadas

Sistema Productivo	Agrícola	Desviación estándar	Pecuario	Desviación estándar	Total agricultura y ganadería
Área promedio ¹	4,4	2,2	5,5	2,5	9,9
PB ² (\$)	25'120.875	9'373.321	10'361.486	9'826.465	35'482.361
CI ³ (\$)	3'767.440	1'947.897	6'990.960	6'573.668	10'758.400
VAB ⁴ (\$)	21'353.435	7'730.943	3'530.526	3'654.294	24'883.961
DEP ⁵ (\$)	1'365.320	444.647	720.870	572.091	2'086.190
VAN ⁶ (\$)	19'988.115	7'775.486	2'809.656	3'192.752	22'797.771
DVA ⁷ (\$)	6'841.171	5'881.390	366.301	183.605	7'207.472
RA ⁸ (\$)	13'146.944	7'340.709	2'443.355	3'098.579	15'590.299
VAN/ha ⁹ (\$)	5'869.556	3'220.220	433.122	500.289	6'302.678
RA/ha ¹⁰ (\$)	4'537.427	3'659.267	368.037	497.365	4'905.464

¹ Área promedio: En hectáreas (ha).

² PB: Producción bruta.

³ CI: Consumo interno.

⁴ VAB: Valor agregado bruto.

⁵ DEP: Depreciación.

⁶ VAN: Valor agregado neto.

⁷ DVA: Demás valores asociados (salarios (S), intereses bancarios (J), arrendamientos (T), impuestos (I)).

⁸ RA: Rentabilidad agropecuaria.

⁹ VAN/ha: Valor agregado neto por hectárea.

¹⁰ RA/ha: Rentabilidad agropecuaria por hectárea.

Esto se debe principalmente al espacio destinado a la ganadería y los costos relacionados con alimentos y vacunas que requieren los demás animales para su desarrollo. Por su parte, se pudo evidenciar que las actividades agrícolas, incluyendo la transformación del cacao en chocolate, generan en promedio \$13'146.944 al año, siendo la principal fuente de ingresos y generación de valor de las familias campesinas de la zona.

4 Discusión

4.1 El ES para el análisis de UPAs

El ES permitió comprender de forma holística la situación económica y la identificación de problemas asociados con la incorrecta disposición del estiércol del ganado y las vainas de cacao en las UPAs familiares. Esto se apoya en otras investigaciones como la de Steinfeld y col. (2009) quienes aseguran que estos materiales contaminan al medio ambiente. Además, Sosa y García (2019) afirman que el estiércol bovino produce gases de efecto invernadero y Pinos y col. (2012) y Steinfeld y col. (2009) aseguran que este excedente genera una serie de micro y ma-

cro nutrientes que afectan negativamente al suelo y los acuíferos.

Del mismo modo, el ES permitió identificar contradicciones filosóficas entre las actividades que desarrollan las UPAs estudiadas y los ideales que promulgan sobre agricultura sostenible y protección del medio ambiente. Esto es similar a los resultados de un caso publicado por Jagustović y col. (2019), en el cual una comunidad de mujeres agricultoras en Doggoh-Jirapa, norte de Ghana, a través de ES identificaron elementos transdisciplinarios contradictorios a sus principios de Climate-Smart Agriculture -CSA y les permitió diseñar estrategias de mejora.

El ES también permitió identificar los excedentes orgánicos como el estiércol del ganado, las vainas de cacao y otros elementos vegetales que pueden ser aprovechados por los campesinos de la región en la elaboración de vermicompost, el cual es rico en microorganismos (Asadu y col., 2019; Barbero y Toso, 2006; FAO, 2013). Esto es beneficioso para los cultivos, debido a que contiene grandes cantidades de bacterias fijadoras de nitrógeno que mejora la retención de agua, la salud biológica y la capacidad de absorción del suelo, el aprovechamiento de las aguas pluviales, la actividad enzimática, la presencia de nutrientes, entre otros (Agegnehu y col., 2016; Argaw, 2017; Rayen y col., 2006; Sharma y col., 2017; Wang y col., 2016); lo que podría convertirse en una oportunidad para solucionar los problemas identificados en materia de contaminación y para apoyar el desarrollo de la agricultura responsable y sostenible.

4.2 Sobre la dimensión económica de la sostenibilidad en comunidades rurales

En este punto, el estudio pretende abrir una discusión basada en el uso del suelo y los valores del VAN y la RA, los cuales sugieren la potencialización de la actividad agrícola por encima de algunas actividades pecuarias como la ganadería. Esto se asemeja a la propuesta de Stamberg (2015), quien en su investigación mediante el ES aconsejó la potencialización de una actividad y la eliminación de otra a partir de los resultados de VAN y RA. Como se pudo evidenciar, la RA del sistema pecuario, en la forma cómo se desarrolla actualmente la ganadería en la UPAs estudiadas y en comparación con las

actividades agrícolas, no genera ingresos suficientes para beneficiar a las familias, lo que abre la puerta a futuras investigaciones sobre formas sostenibles de aprovechar el suelo en la ruralidad, considerando temas como la diversificación de cultivos, la cantidad de reses por hectárea y el uso de establos (Rojas, Botero y Osorio, 2013). Esto último se apoya en la propuesta de Fernández y col. (2016) sobre los establos adecuados que facilitan la disposición de las excretas.

Lo anterior sugiere además la necesidad de crear un sistema completo de gestión de excedentes orgánicos que permita el aprovechamiento del estiércol bovino, las vainas de cacao y otros excedentes vegetales, mediante procesos de compostaje. Esto resalta la necesidad de adelantar estudios enfocados en el diseño de infraestructura adecuada y el asesoramiento en el manejo de estos materiales.

Se espera que esta investigación sea un insumo para la toma de decisiones de las propietarias de las UPAs estudiadas, en el mejoramiento de su ingreso neto, el impulso de su independencia económica, su empoderamiento, el fortalecimiento de su identidad, su compromiso como mujer campesina (Bottello y Guerrero, 2017) y además sirva como base para futuras investigaciones relacionadas con economía y desarrollo rural sostenible.

5 Conclusiones

La investigación aporta a la literatura información sobre la aplicación del ES al análisis de UPAs, principalmente por la atención particular que este enfoque presta a los flujos y su interacción con los actores involucrados, lo que conllevó a la identificación de la falta de asesoramiento en prácticas sostenibles y por lo cual, algunas de ellas contradicen sus ideologías. Así mismo, se reconocen algunas limitantes propias de este enfoque, dado que exige la recolección de grandes cantidades de información, y por consiguiente demanda mayores cantidades de tiempo, recursos y asesoramiento de expertos en múltiples disciplinas.

La falta de organización y registros contables impide que los propietarios de las UPAs sean conscientes de la forma en que fluye el dinero a través de sus negocios y se considera como una limitante

para el diseño de planes y estrategias de mejora, que en su mayoría requieren de recursos económicos con los que no cuentan las familias campesinas; además, la falta de inversión pública y el difícil acceso al crédito reduce aún más las posibilidades de los campesinos en la obtención de tecnología, asesoría e infraestructura adecuada.

Finalmente, se concluye que el uso del suelo en Colombia es un problema que se refleja en la distribución productiva aplicada por las UPAs familiares, donde la mayor parte del área es utilizada para el pastoreo de bovinos que, en promedio, gozan de 1,5 ha por ejemplar. Para el desarrollo de la agricultura sostenible es necesario promover métodos eficientes que permitan mejorar la economía familiar y disminuir las brechas de desigualdad entre el campo y la ciudad, además de garantizar el incremento del suelo agrícola, como estrategia de seguridad alimentaria para el sostenimiento de las futuras generaciones.

Agradecimientos

Se agradece a Minciencias y a la Corporación Universidad de Investigación y Desarrollo- UDI, financiadores de la investigación mediante el convenio 382-2019. Además, se reconoce la colaboración prestada por AMMUCALE en cabeza de Psic. Tailana Prieto; los actores relacionados con el caso de estudio, la señora Rosa Isabel Rincón, Román Bastos y la señora Zoraida Uribe. Adicionalmente, se agradece a los expertos consultados: Msc. Melissa Ayala asesora en etnobiología, Ing. Luz Holanda asesora en producción responsable y Econ. Adolfo Botero asesor en comercio justo.

Referencias

- Agegnehu, G. y col. (2016). «Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil». En: *Science of The Total Environment* 543, 295-306. Online: <https://bit.ly/3uEIZyI>.
- Alcaldía de Lebrija (2016). «Economía». Online: <https://bit.ly/3vV8LPm>.
- Amaya, M., R. Mendez y A. Hernández (2018). «Revisión documental sobre la experiencia de la Asociación Municipal de Mujeres Campesinas de Lebrija Santander "AMMUCALE"». Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Online: <https://bit.ly/3tSr1Y3>.
- Argaw, A. (2017). «Organic and inorganic fertilizer application enhances the effect of *Bradyrhizobium* on nodulation and yield of peanut (*Arachis hypogaea* L.) in nutrient depleted and sandy soils of Ethiopia». En: *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 6.3, 219-231. Online: <https://bit.ly/3f8GXzZ>.
- Arias, R., T. Mader y P. Escobar (2008). «Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche». En: *Archivos de medicina veterinaria* 40.1, 7-22. Online: <https://bit.ly/3tYFPVl>.
- Asadu, C. y col. (2019). «Survey on solid wastes management by composting: Optimization of key process parameters for biofertilizer synthesis from agro wastes using response surface methodology (RSM)». En: *Artificial Intelligence in Agriculture* 3, 52-61. Online: <https://bit.ly/2RzX8hQ>.
- Banco Mundial (2019a). «Índice de Gini - Colombia». Online: <https://bit.ly/3o0ndTe>.
- (2019b). «Uso de fertilizantes por país». Online: <https://bit.ly/2R7yNzV>.
- Barbero, S. y D. Toso (2006). «Systemic Design of a Productive Chain: reusing coffee waste as an input to agricultural production». En: *Environmental Quality Management*, 24-46. Online: <https://bit.ly/3tSj70Y>.
- Bertalanffy, L. Von. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller.
- Bistagnino, L. (2009). «Progettare la sostenibilità produttiva e ambientale in agricoltura, industria e comunità locali». En: Slow Food Editore. Cap. Systemic Design sistemico.
- (2011). *Systemic design: designing the productive and environmental sustainability*. Politecnico di Torino. Online: <https://bit.ly/3y8Wt7R>.
- Botello, H. e I. Guerrero (2017). «Condiciones para el empoderamiento de la mujer rural en Colombia». En: *Entramado* 13.1, 62-70. Online: <https://bit.ly/3eG1PzH>.
- Capra, F. (1996). *The Web of Life: A New Scientific Understanding of Living Systems*. Anchor Books.

- Carrá, J. C. (1961). «Pensamiento Sistémico». Online: <https://bit.ly/2RSJ57l>.
- Ceschin, F. (2014). *Sustainable product-service systems: Between strategic design and transition studies*. Springer Science y Business Media.
- Cruz, E. y col. (2018). «Mujeres por el buen vivir, perspectivas desde la investigación para la paz. Asociación municipal de mujeres campesinas del municipio de Lebrija "AMMUCALE"». Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Online: <https://bit.ly/2Qoof5J>.
- Cubillo, A. y A. Hidalgo (2019). «Una propuesta para la construcción de un transdesarrollo global. Los Objetivos del Buen Vivir». Online: <https://bit.ly/3ydVi6X>.
- DANE (2015). *Censo Nacional Agropecuario (CNA). Resultados Nacionales Con Resúmenes Provinciales CNA 2000*. Online: <https://bit.ly/3w4DNnW>.
- (2019). *Boletín Técnico Pobreza monetaria en Colombia año 2018*. Inf. téc. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Online: <https://bit.ly/3y99Qoy>.
- Díaz, L., J. Ortiz y D. Rodríguez (2011). «Propuesta para el fortalecimiento de las condiciones socioeconómicas de la zona de influencia de ammucale" (Sector rural del municipio de Lebrija)». Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santande. Online: <https://bit.ly/33G9M1z>.
- EPM (2020). «Tips para el uso inteligente». Online: <https://bit.ly/3y9cyKK>.
- FAO (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Online: <https://bit.ly/33IOb8y>.
- Fernández, C. y col. (2016). *Establo sostenible. Evaluación en granjas de vacuno de leche como estrategia para la mejora de la rentabilidad*. Inf. téc. 122. África. Online: <https://bit.ly/3foKWIX>.
- Garciandía, J. (2011). *Pensar sistémico, una introducción al pensamiento sistémico*. Pontificia Universidad Javeriana. Online: <https://bit.ly/3flcnn8>.
- Huanacuni, F. (2010). *Buen Vivir / Vivir Bien Filosofía, políticas, estrategias y experiencias regionales andinas*. Coordinadora Andina de Organizaciones Indígenas (CAOI). Online: <https://bit.ly/3hx7muo>.
- Jagustović, R. y col. (2019). «Contribution of systems thinking and complex adaptive system attributes to sustainable food production: Example from a climate-smart village». En: *Agricultural systems* 171, 65-75. Online: <https://bit.ly/2SMmN7r>.
- James, P. (2015). *Urban sustainability in theory and practice: circles of sustainability*. Routledge. Online: <https://bit.ly/3fDJcMj>.
- Johansen, O. (1993). *Introducción a la teoría general de sistemas*. Editorial Limusa. Online: <https://bit.ly/2RWe2Yj>.
- Kalmanovitz, Sa. y E. López (2003). «La agricultura en Colombia entre 1950 y 2000». En: *Revista del Banco de la República* 76.912, 1-45. Online: <https://bit.ly/3fs2808>.
- Meadows, D. (1997). *Lugares donde intervenir en un sistema*. Whole Earth.
- (2008). *Thinking in systems: A primer*. Chelsea green publishing.
- ONU (2015). «Objetivos de desarrollo sostenible». Online: <https://bit.ly/2SNQOnn>.
- Pinos, J. y col. (2012). «Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América». En: *Agrociencia* 46.4, 359-370. Online: <https://bit.ly/3w7vN5B>.
- Rayen, M. y col. (2006). «Efecto de la adición de compost sobre propágulos micorrízicos arbusculares en un suelo volcánico del centro sur de Chile». En: *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 6.3, 26-39. Online: <https://bit.ly/3ycITQQ>.
- Rojas, D., J. Botero y O. Osorio (2013). «Análisis técnico económico de sistemas de ganadería en confinamiento modelo establo invernadero en el departamento del Quindío». En: *Sinapsis* 5.5, 127-136. Online: <https://bit.ly/2QnUMm0>.
- Rovaletti, M. L. (1989). «Teoría general de los sistemas». En: *Signo y Pensamiento* 8.15, 45 -56. Online: <https://bit.ly/3w9mXnR>.
- Ruiz, R. y L. Oregui (2001). «El enfoque sistémico en el análisis de la producción animal: revisión bibliográfica (Revisión)». En: *Invest. Agr.: Prod. Sanid. Anim* 16.1, 29-60. Online: <https://bit.ly/3tr5teg>.
- Sharma, A. y col. (2017). «Efficient Microorganism compost benefits plant growth and improves soil health in calendula and marigold». En: *Horticultural Plant Journal* 3.2, 67-72. Online: <https://bit.ly/3btYdic>.
- Sosa, B. e Y. García (2019). «Emisión de gases de efecto invernadero en el suelo bajo el uso de abonos verdes». En: *Agronomía Mesoamericana* 30.3, 767-782. Online: <https://bit.ly/3yw9uZs>.
- Stamberg, Adilson R Paz (2015). «Enfoque sistémico en administración rural: estudio de la unidad

- de producción familiar». En: *Ciencias Administrativas* 5, 23124–3738. Online: <https://bit.ly/3flGB9p>.
- Steinfeld, H. y col. (2009). *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*. FAO.
- Vargas, A. y col. (2020). *Contribuciones académicas a los Diseños y Sostenibilidades en Colombia*. Unidad de Publicaciones Universidad de Investigación y Desarrollo – UDI. Online: <https://bit.ly/3hrdZyh>.
- Vezzoli, C. y col. (2014). *Product-service system design for sustainability*. Routledge. Online: <https://bit.ly/33RhENG>.
- Wang, X. y col. (2016). «Impacts of manure application on soil environment, rainfall use efficiency and crop biomass under dryland farming». En: *Scientific reports* 6.1, 1-8. Online: <https://go.nature.com/3omgVNT>.

NORMAS PARA AUTORES

El presente manual describe los pasos que deberá tener en cuenta para realizar un envío satisfactorio de su manuscrito. Tómese el tiempo necesario para leer cuidadosamente el presente documento.

1 Información general

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» es una publicación científica bilingüe de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, editada desde enero de 2002 de forma ininterrumpida, con periodicidad fija semestral, especializada en Ciencias de la Vida, Ambientales y sus líneas transdisciplinarias como Ciencias de la Tierra, Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, y Desarrollo Local Sostenible, entre otras.

Es una revista científica arbitrada, que utiliza el sistema de evaluación externa por expertos (*peer-review*), bajo metodología de pares ciegos (*double-blind review*), conforme a las normas de citación del estilo Harvard. El cumplimiento de este sistema permite garantizar a los autores un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita a la publicación su inclusión en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» se encuentra indexada en SCOPUS, en el Emerging Source Citation Index ESCI de la Web of Science, en el directorio y catálogo selectivo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex), en el Sistema de Información Científica REDALYC, en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto DOAJ en el sistema de Clasificación Integrada de Revistas Científicas CIRC, en BaseSearch, la Máquina de Búsqueda Académica de *Bielefeld*, y en más de 42 repositorios, bibliotecas y catálogos especializados de Iberoamérica.

La revista se edita en doble versión: impresa (ISSN: 1390-3799) y electrónica (e-ISSN: 1390-8596), en español e inglés, siendo identificado además cada trabajo con un DOI (Digital Object Identifier System).

Todos los artículos son publicados para poder

acceder a su contenido de manera abierta sin restricciones económicas, tanto en las fases de envío, revisión, publicación y traducción integrada de los manuscritos.

2 Alcance y política

2.1 Temática

Contribuciones originales en materia de Ciencias de la Vida, Ambientales y sus líneas transdisciplinarias como Ciencias de la Tierra, Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, y Desarrollo Local Sostenible y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinariamente con la línea temática central.

2.2 Aportaciones

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» edita preferentemente resultados de investigación empírica, teórica o experimental (*Scientific Articles*), redactados en español y/o inglés, siendo también admisibles selectas revisiones bibliográficas (*Reviews*).

Todos los trabajos deben ser originales, no haber sido publicados en ningún medio ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

De esta manera, las aportaciones en la revista pueden ser:

a. Investigaciones Científicas (*Scientific Articles*):

5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, introducción, materiales y métodos, resultados, conclusiones, tablas, figuras y referencias. Las referencias deberán estar citadas, ser actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

b. Revisiones (*Reviews*):

Máximo sugerido 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se valorará especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 50 obras.

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» tiene periodicidad semestral (20 artículos por año), publicada en los meses de marzo y septiembre.

2.3 Política económica abierta

«La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja», es una revista abierta, donde todos los artículos son publicados para poder acceder a su contenido de manera abierta sin restricciones de contenido o económicas, tanto en el proceso de revisión como de publicación y traducción íntegra de los manuscritos. La revista es publicada por el Editorial Abya-Yala, en Quito, Ecuador.

2.4 Copyright

Las obras que se publican en «La Revista de Ciencias de la Vida, La Granja» están sujetas a los siguientes términos:

1. La Universidad Politécnica Salesiana (RUC: 0190151530001) conserva los derechos patrimoniales (copyright) de las obras publicadas, y favorece y permite la reutilización de las mismas bajo la licencia *Creative Commons Reconocimiento-No-Comercial-Sin Obra Derivada 3.0 Ecuador*, por lo cual se pueden copiar, usar, difundir, transmitir y exponer públicamente, siempre que:
 - Se cite la autoría y fuente original de su publicación (revista, editorial, URL y DOI de la obra).
 - No se usen para fines comerciales u onerosos.
 - Se mencione la existencia y especificaciones de esta licencia de uso.
2. La publicación otorgará a cada artículo un *Digital Object Identifier* (DOI). Ejemplo: Navarrete, Bernardo, Oswaldo Valarezo, Ernesto Cañarte y Ramón Solórzano. 2017. Efecto del nim (*Azadirachta indica* Juss.) sobre *Bemisia tabaci* Gennadius (*Hemiptera: Aleyrodidae*) y controladores biológicos en el cultivo del melón *Cucumis melo* L. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 25(1):33-4. <https://doi.org/10.17163/ret.n12.2016.05>

3 Presentación, estructura y envío de los manuscritos

Todos los autores han registrarse con sus créditos, filiaciones institucionales, país e identificador ORCID en la plataforma OJS; si bien sólo uno de ellos será el responsable de correspondencia. Ningún autor podrá enviar o tener en revisión dos manuscritos de forma simultánea, estimándose una carencia de un número consecutivo (1 año).

Cuando presente el artículo, usted no debe intentar diseñar el manuscrito, no justifique el documento, o centre los títulos, ni utilice el formato de doble columna. El único formato requerido es que los nombres en latín de los organismos deben estar en *itálicas*.

Los trabajos se presentarán en tipo de letra Arial número 10, interlineado doble (excepto para los títulos de tablas y figuras), justificado completo y sin tabuladores ni espacios en blanco entre párrafos. Todas las líneas deberán estar enumeradas de forma automática (Word>Diseño de página>Números de línea>continuo). Solo se separarán con un espacio en blanco los grandes bloques (título, autores, resumen, introducción, materiales y métodos, resultados, conclusiones y referencias). La página debe tener 2 centímetros en todos sus márgenes (descargar “manuscrito anonimizado”).

Los trabajos deben presentarse en documento de Microsoft Word (.doc o .docx) o LaTeX (.tex) que incluya las referencias en formato (.bib), siendo necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Los manuscritos deben ser enviados única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System), en el cual todos los autores deben darse de alta previamente. No se aceptan originales enviados a través de correo electrónico u otra interfaz.

Por motivos de mejoramiento de la visibilidad e impacto de las publicaciones, todos los autores deben tener un número ORCID <<https://orcid.org/>> y se sugiere que al menos uno de los autores tenga una cuenta en Research Gate <<https://www.researchgate.net/home>>.

3.1 Estructura del manuscrito

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones científicas, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones), cualquier uso de anexos se enviará como un documento aparte en Word o Latex y será catalogada como información complementaria (descargar “manuscrito anonimizado”).

Los trabajos que se traten de Revisiones Bibliográficas, podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente en Materiales y Métodos, Resultados y Discusión. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias que en lo posible deberán incluir un link electrónico de referencia. En cualquier caso los documentos constarán de las siguientes secciones:

a. Título (español) / Title (inglés):

Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda. Se aceptan como máximo 25 palabras con espacios incluidos. El título no solo es responsabilidad de los autores, pudiéndose proponer cambios por parte del Consejo Editorial.

Es necesario escribirlo en mayúsculas y minúsculas, centrado; si contiene nombres científicos de taxa, destacarlos con cursivas, sin el autor del taxón.

b. Nombres y filiación de los autores:

Nombre(s) y Apellido(s) de cada uno de los autores, organizados por orden de prelación. Junto a los nombres ha de seguir centro de trabajo, dirección, ciudad, país, correo electrónico de cada autor y número de ORCID. Adicionalmente se debe incluir qué autor será el responsable del manuscrito o autor por correspondencia, señalándolo con un asterisco (*). Dicha información será únicamente presentada en el archivo modelo denominado “presentación-portada” (descargar “presentación-portada”)

c. Resumen (español) / Abstract (inglés):

Tendrá como extensión máxima 250 palabras, primero en español y después en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa implícita o explícitamente y en este orden: Justificación del tema; Objetivos; Metodología y muestra; Principales resultados; Principales conclusiones. Ha de estar

escrito de manera impersonal “El presente trabajo analiza...”. En el caso del abstract no emplee traductores automáticos, tome el debido cuidado al traducir su resumen, es la primera impresión que tendrá el revisor.

d. Palabras clave (español) / Keywords (inglés):

Se deben exponer de 4 a 6 descriptores por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Trate de no repetir las mismas palabras del título. Deben colocarse tanto en español, como en inglés.

e. Introducción:

Se sugiere utilizar el sistema SPPR Situación (Estado del Arte), Problema, Pregunta (Hipótesis del Estudio) y Respuesta (Objetivo del Estudio). De esta manera, se debe exponer de manera clara y con suficientes referencias bibliográficas el estado del arte actualizado de su estudio, el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando la literatura más significativa y actual del tema.

f. Materiales y métodos:

Deben ser redactados de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. Describirá cronológicamente la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Asegurando en todo momento la replicabilidad de su experimento explicando el diseño experimental, equipos de laboratorio utilizados y programas computacionales, entre otros. En toda metodología utilizada, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.

g. Resultados y Discusión:

Se procurará resaltar las observaciones más importantes. Debe incluir la información cuantitativa o cualitativa que sustentará las conclusiones finales. Aparecerán en una secuencia lógica en el texto y las Tablas, Figuras y ecuaciones imprescindibles evitando la duplicidad de datos. Toda tabla, figura o ecuación deberá estar citada en el texto y enumerada secuencialmente.

Para el caso de las ecuaciones, emplee el editor de ecuaciones de Word o mediante programación en Latex, coloque de manera consecutiva las ecuaciones ordenándolas mediante un número encerrado entre paréntesis (1), para mejor comprensión vea el documento “manuscrito anónimizado”.

Las fotos, ilustraciones y gráficas únicamente se presentan como figuras, y éstas, al igual que las tablas, deben incluir una descripción explicativa para cada una, ver manuscrito anónimizado.

En el texto, toda tabla y figura deben ser nombradas, analizadas y discutidas resaltando los hallazgos más representativos y/o limitaciones del estudio. Cite dentro del texto Figura 6 o Tabla 1, por ejemplo. No abrevie la palabra figura o tabla.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas, o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi, es decir el tamaño de la figura debe ser grande, apropiado para la publicación en formato de calidad. Cada figura debe ser adjuntada con el envío en formato TIFF, PNG o JPG enumeradas en el orden de aparición. Los autores deberán tomar en cuenta que las leyendas y ejes de las figuras deben ser perfectamente legibles tanto al ampliar como reducir la figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 19,2 × 26,2 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente a un cuarto de su tamaño final de publicación, ejemplo: 4,7 × 6,5 cm.

Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, d, etcétera. Las fotografías deben gravarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión. Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad única del autor el obtener el/los permisos correspondientes. Evite problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

h. Conclusiones y Discusión:

El apartado de Discusiones puede aparecer en los Resultados o en las Conclusiones, a preferencia del autor. Las Conclusiones resumirán los ha-

llazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, el apartado de discusión y conclusiones debe incluir las implicaciones y líneas para futuras investigaciones.

i. Agradecimientos (opcionales):

El *Council Science Editors* recomienda a los autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales. En todo caso, para la valoración científica del manuscrito, este debe ir anonimizado con XXXX solo para su evaluación inicial, a fin de no identificar autores y equipos de investigación, que deben ser explicitados en la Carta de Presentación y posteriormente en el manuscrito final.

j. Referencias:

Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en el texto, ni tampoco deben ser incluidas citas solamente en el texto sin contener su respectiva referencia. Su número debe ser suficiente para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia. Se presentarán alfabéticamente por el primer apellido del autor, siguiendo el estilo Harvard, que se describe a continuación y/o que se puede presentar con el gestor de citas del procesador de texto utilizado.

3.2 Normas para las referencias

3.2.1 Como se cita en el texto

Harvard es un estilo de citación que permite colocar los dos apellidos del autor (muchas veces éstos aparecen separados con un guión), si es que los presenta. Caso contrario se utiliza un solo apellido, como es usual en la tradición anglosajona.

Un autor: Samaniego (2012); (Samaniego, 2012); Valdés-Pérez (2016); (Valdés-Pérez, 2016); (Valdés Pérez, 2016); Valdés Pérez (2016).

Hasta tres autores: Samaniego, Vásquez y Torres (2010); (Samaniego, Vásquez y Torres, 2010).

Más de tres autores: Samaniego *et al.* (2010); (Samaniego *et al.*, 2010)

3.2.2 Referencias

a. Artículo de revista (incluir siempre el DOI del artículo o en lo posible la dirección electrónica URL del artículo):

Arnold, M. y Osorio, F. (1998) Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General del Sistemas. Revista Cinta de Moebio [en línea], (3). Universidad de Chile. Disponible en <<https://goo.gl/FwjAqo>>[consulta: 20 enero 2005].

Dhillon, B. (2004) Should Doctors Wear Ties? Medical Monthly [en línea], 3 (1), 55-88. Disponible en <<https://goo.gl/pHzUxJ>>[consulta: 20 abril 2006].

b. Libros completos:

Un Autor:

Holt, DH 1997, Management principles and practices, Prentice Hall, Sydney.

Dos Autores:

McCarthy, EJ, William, DP & Pascale, GQ 1997, Basic marketing, Irwin, Sydney.

Tres o más autores:

Bond, WR, Smith, JT, Brown, KL & George, M 1996, Management of small firms, McGraw-Hill, Sydney.

c. Medios electrónicos:

Reed, S 2015, 'Shift to lower-carbon energy is too slow, report warns', New York Times, 9 November. Available from: <https://goo.gl/iczP53>. [10 November 2015].

Es prescriptivo que todas las citas que cuenten con DOI (Digital Object Identifier System) estén reflejadas en las Referencias (pueden obtenerse en <http://goo.gl/gfruh1>). Todas las revistas y libros que no tengan DOI deben aparecer con su link (en su versión online, en caso de que la tengan, acortada, mediante Google Shortener: <http://goo.gl>)

Los artículos de revistas deben ser expuestos en idioma inglés, a excepción de aquellos que se encuentren en su idioma de origen, caso en el que se

expondrá en ambos idiomas utilizando corchetes. Todas las direcciones web que se presenten tienen que ser acortadas en el manuscrito, a excepción de los DOI que deben ir en el formato indicado (<https://doi.org/XXX>).

3.3 Epígrafes

Los epígrafes del cuerpo del artículo se numerarán en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1.

Al final de cada epígrafe numerado se establecerá un espacio.

4 Proceso de envío

Deben remitirse a través del sistema OJS previo registro en la dirección <<http://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/user/register>> de la revista, los siguientes archivos:

Archivo N°1: Cover Letter, Cesión de derechos y declaración de conflictos de interés:
Descargue el modelo "cover letter".

Archivo N°2: Presentación-portada:
Este archivo (Word o Latex), contendrá tres apartados claramente identificables:

- a) Título en español e inglés, nombres y apellidos de los autores de forma estandarizada con número de ORCID, filiación y grado académico.
- b) Resumen, abstract, palabras claves y keywords.
- c) Una declaración de que el manuscrito se trata de una aportación original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista, confirmación de las autorías firmantes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial (descargar "presentación-portada").

Archivo N°3: Manuscrito totalmente anonimizado, conforme a las normas referidas en precedencia.

Archivo N°4: El autor de correspondencia deberá presentar una lista de 5 potenciales revisores del ar-

título que cumplan los siguientes criterios (descargar modelo “evaluadores sugeridos”): información:

- No ser del mismo país del autor de correspondencia. Por ejemplo, si el autor de correspondencia trabaja en Brasil, el revisor propuesto NO puede estar vinculado a instituciones del mismo país del autor de correspondencia, es decir, “Brasil”).

El formato de este archivo podrá realizarse en cualquier procesador de texto Word / LaTeX y se deberá aportar de cada potencial revisor la siguiente

- Nombres y Apellidos
- Filiación
- Grado académico
- Correo electrónico
- Código Orcid correspondiente

Indicar brevemente la pertinencia de dicho revisor para la evaluación del manuscrito

El no cumplimiento de algunas de los requisitos de la presente normativa podrá ser causal de rechazo AUTOMATICO del manuscrito.
Tome el debido tiempo para completar de manera correcta el proceso de envío.

LA GRANJA: REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA

NÚMERO ESPECIAL
CIENCIA GEOESPACIAL



Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur-Quito

Vista aérea.

César Iván Álvarez (2021)

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Juan Cárdenas Tapia, sdb

Rector

©Universidad Politécnica Salesiana

Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja, Cuenca, Ecuador

Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Fax: (+593 7) 408 89 58 Casilla postal 2074

Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

Web: www.ups.edu.ec