

VOL VIII

Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais

Eduardo Spers
(Organizador)



EDITORA
ARTEMIS

2026

VOL VIII

Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais

Eduardo Spers
(Organizador)



EDITORA
ARTEMIS

2026



O conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons Atribuição-Não-Comercial NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). Direitos para esta edição cedidos à Editora Artemis pelos autores.

Permitido o download da obra e o compartilhamento, desde que sejam atribuídos créditos aos autores, e sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

A responsabilidade pelo conteúdo dos artigos e seus dados, em sua forma, correção e confiabilidade é exclusiva dos autores. A Editora Artemis, em seu compromisso de manter e aperfeiçoar a qualidade e confiabilidade dos trabalhos que publica, **conduz a avaliação cega pelos pares de todos manuscritos publicados, com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.**

Editora Chefe	Prof. ^a Dr. ^a Antonella Carvalho de Oliveira
Editora Executiva	M. ^a Viviane Carvalho Mocellin
Direção de Arte	M. ^a Bruna Bejarano
Diagramação	Elisangela Abreu
Organizador	Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers
Imagem da Capa	Bruna Bejarano, Arquivo Pessoal
Bibliotecário	Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Conselho Editorial

Prof.^a Dr.^a Ada Esther Portero Ricol, *Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”*, Cuba
Prof. Dr. Adalberto de Paula Paranhos, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
Prof. Dr. Agustín Olmos Cruz, *Universidad Autónoma del Estado de México*, México
Prof.^a Dr.^a Amanda Ramalho de Freitas Brito, Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Prof.^a Dr.^a Ana Clara Monteverde, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof.^a Dr.^a Ana Júlia Viamonte, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
Prof. Dr. Ángel Mujica Sánchez, *Universidad Nacional del Altiplano*, Peru
Prof.^a Dr.^a Angela Ester Mallmann Centenaro, Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
Prof.^a Dr.^a Begoña Blandón González, *Universidad de Sevilla*, Espanha
Prof.^a Dr.^a Carmen Pimentel, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof.^a Dr.^a Catarina Castro, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
Prof.^a Dr.^a Cirila Cervera Delgado, *Universidad de Guanajuato*, México
Prof.^a Dr.^a Cláudia Neves, Universidade Aberta de Portugal
Prof.^a Dr.^a Cláudia Padovesi Fonseca, Universidade de Brasília-DF, Brasil
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
Dr. Cristo Ernesto Yáñez León – New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, Estados Unidos
Prof. Dr. David García-Martul, *Universidad Rey Juan Carlos de Madrid*, Espanha



Prof.^a Dr.^a Deuzimar Costa Serra, Universidade Estadual do Maranhão, Brasil
 Prof.^a Dr.^a Dina Maria Martins Ferreira, Universidade Estadual do Ceará, Brasil
 Prof.^a Dr.^a Edith Luévano-Hipólito, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, México
 Prof.^a Dr.^a Eduarda Maria Rocha Teles de Castro Coelho, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal
 Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers, Universidade de São Paulo (USP), Brasil
 Prof. Dr. Eloi Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima, Brasil
 Prof.^a Dr.^a Elvira Laura Hernández Carballido, *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, México
 Prof.^a Dr.^a Emilias Darlene Carmen Lebus, *Universidad Nacional del Nordeste*, Argentina
 Prof.^a Dr.^a Erla Mariela Morales Morgado, *Universidad de Salamanca*, Espanha
 Prof. Dr. Ernesto Cristina, *Universidad de la República*, Uruguay
 Prof. Dr. Ernesto Ramírez-Briones, *Universidad de Guadalajara*, México
 Prof. Dr. Fernando Hitt, *Université du Québec à Montréal*, Canadá
 Prof. Dr. Gabriel Díaz Cobos, *Universitat de Barcelona*, Espanha
 Prof.^a Dr.^a Gabriela Gonçalves, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
 Prof.^a Dr.^a Galina Gumovskaya – Higher School of Economics, Moscow, Russia
 Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
 Prof.^a Dr.^a Gladys Esther Leoz, *Universidad Nacional de San Luis*, Argentina
 Prof.^a Dr.^a Glória Beatriz Álvarez, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
 Prof. Dr. Gonçalo Poeta Fernandes, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal
 Prof. Dr. Gustavo Adolfo Juarez, *Universidad Nacional de Catamarca*, Argentina
 Prof. Dr. Guillermo Julián González-Pérez, *Universidad de Guadalajara*, México
 Prof. Dr. Håkan Karlsson, *University of Gothenburg*, Suécia
 Prof.^a Dr.^a Iara Lúcia Tescarollo Dias, Universidade São Francisco, Brasil
 Prof.^a Dr.^a Isabel del Rosario Chiyon Carrasco, *Universidad de Piura*, Peru
 Prof.^a Dr.^a Isabel Yohena, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
 Prof. Dr. Ivan Amaro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
 Prof. Dr. Iván Ramon Sánchez Soto, *Universidad del Bío-Bío*, Chile
 Prof.^a Dr.^a Ivânia Maria Carneiro Vieira, Universidade Federal do Amazonas, Brasil
 Prof. Me. Javier Antonio Albornoz, *University of Miami and Miami Dade College*, Estados Unidos
 Prof. Dr. Jesús Montero Martínez, *Universidad de Castilla - La Mancha*, Espanha
 Prof. Dr. João Manuel Pereira Ramalho Serrano, Universidade de Évora, Portugal
 Prof. Dr. Joaquim Júlio Almeida Júnior, UniFIMES - Centro Universitário de Mineiros, Brasil
 Prof. Dr. Jorge Ernesto Bartolucci, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México
 Prof. Dr. José Cortez Godinez, Universidad Autónoma de Baja California, México
 Prof. Dr. Juan Carlos Cancino Díaz, Instituto Politécnico Nacional, México
 Prof. Dr. Juan Carlos Mosquera Feijoo, *Universidad Politécnica de Madrid*, Espanha
 Prof. Dr. Juan Diego Parra Valencia, *Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín*, Colômbia
 Prof. Dr. Juan Manuel Sánchez-Yáñez, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, México
 Prof. Dr. Juan Porras Pulido, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México
 Prof. Dr. Júlio César Ribeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil



Prof. Dr. Leinig Antonio Perazolli, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil

Prof.^a Dr.^a Livia do Carmo, Universidade Federal de Goiás, Brasil

Prof.^a Dr.^a Luciane Spanhol Bordignon, Universidade de Passo Fundo, Brasil

Prof. Dr. Luis Fernando González Beltrán, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México

Prof. Dr. Luis Vicente Amador Muñoz, *Universidad Pablo de Olavide*, Espanha

Prof.^a Dr.^a Macarena Esteban Ibáñez, *Universidad Pablo de Olavide*, Espanha

Prof. Dr. Manuel Ramiro Rodriguez, *Universidad Santiago de Compostela*, Espanha

Prof. Dr. Manuel Simões, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

Prof.^a Dr.^a Márcia de Souza Luz Freitas, Universidade Federal de Itajubá, Brasil

Prof. Dr. Marcos Vinicius Meiado, Universidade Federal de Sergipe, Brasil

Prof.^a Dr.^a Mar Garrido Román, *Universidad de Granada*, Espanha

Prof.^a Dr.^a Margarida Márcia Fernandes Lima, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Prof.^a Dr.^a María Alejandra Arecco, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina

Prof.^a Dr.^a Maria Aparecida José de Oliveira, Universidade Federal da Bahia, Brasil

Prof.^a Dr.^a Maria Carmen Pastor, *Universitat Jaume I*, Espanha

Prof.^a Dr.^a Maria da Luz Vale Dias – Universidade de Coimbra, Portugal

Prof.^a Dr.^a Maria do Céu Caetano, Universidade Nova de Lisboa, Portugal

Prof.^a Dr.^a Maria do Socorro Saraiva Pinheiro, Universidade Federal do Maranhão, Brasil

Prof.^a Dr.^a M^aGraça Pereira, Universidade do Minho, Portugal

Prof.^a Dr.^a Maria Gracinda Carvalho Teixeira, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil

Prof.^a Dr.^a María Guadalupe Vega-López, *Universidad de Guadalajara*, México

Prof.^a Dr.^a Maria Lúcia Pato, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal

Prof.^a Dr.^a Maritza González Moreno, *Universidad Tecnológica de La Habana*, Cuba

Prof.^a Dr.^a Mauriceia Silva de Paula Vieira, Universidade Federal de Lavras, Brasil

Prof. Dr. Melchor Gómez Pérez, Universidad del Pais Vasco, Espanha

Prof.^a Dr.^a Ninfa María Rosas-García, Centro de Biotecnología Genómica-Instituto Politécnico Nacional, México

Prof.^a Dr.^a Odara Horta Boscolo, Universidade Federal Fluminense, Brasil

Prof. Dr. Osbaldo Turpo-Gebera, *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*, Peru

Prof.^a Dr.^a Patrícia Vasconcelos Almeida, Universidade Federal de Lavras, Brasil

Prof.^a Dr.^a Paula Arcoverde Cavalcanti, Universidade do Estado da Bahia, Brasil

Prof. Dr. Rodrigo Marques de Almeida Guerra, Universidade Federal do Pará, Brasil

Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares, Universidade Federal do Piauí, Brasil

Prof. Dr. Sergio Bitencourt Araújo Barros, Universidade Federal do Piauí, Brasil

Prof. Dr. Sérgio Luiz do Amaral Moretti, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Prof.^a Dr.^a Silvia Inés del Valle Navarro, *Universidad Nacional de Catamarca*, Argentina

Prof.^a Dr.^a Solange Kazumi Sakata, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)- USP, Brasil

Prof.^a Dr.^a Stanislava Kashtanova, *Saint Petersburg State University*, Russia

Prof.^a Dr.^a Susana Álvarez Otero – Universidad de Oviedo, Espanha

Prof.^a Dr.^a Teresa Cardoso, Universidade Aberta de Portugal

Prof.^a Dr.^a Teresa Monteiro Seixas, Universidade do Porto, Portugal

Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Universidade Federal de Viçosa, Brasil

Prof.^a Dr.^a Vanessa Bordin Viera, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

Prof.^a Dr.^a Vera Lúcia Vasilévski dos Santos Araújo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

Prof. Dr. Wilson Noé Garcés Aguilar, *Corporación Universitaria Autónoma del Cauca*, Colômbia

Prof. Dr. Xosé Somoza Medina, *Universidad de León*, Espanha

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E82 Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais VIII [livro eletrônico] / Organizador Eduardo Eugênio Spers. – 1. ed. – Curitiba, PR: Editora Artemis, 2026.
il. color.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Edição bilíngue.

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-82858-32-1

DOI 10.37572/EdArt_250926321

1. Ciências agrárias. 2. Meio ambiente. 3. Sustentabilidade.
I. Spers, Eduardo Eugênio

CDD 630

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422



PRÓLOGO

Os desafios contemporâneos relacionados ao uso dos recursos naturais, à conservação da biodiversidade, às mudanças ambientais e à sustentabilidade dos sistemas produtivos exigem abordagens cada vez mais integradas. Nas Ciências Agrárias e Ambientais, essa integração se torna especialmente relevante diante da necessidade de conciliar produção, conservação, desenvolvimento territorial e uso responsável dos recursos, considerando tanto os processos ecológicos quanto as dimensões sociais e econômicas envolvidas.

O oitavo volume de ***Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais*** reúne quatorze capítulos organizados em quatro eixos temáticos: **Território, mudanças ambientais e conservação; Solo, biodiversidade e agroecossistemas sustentáveis; Produção sustentável, manejo e organização dos sistemas produtivos; e Economia circular, transformações ambientais e história da agricultura.** Em conjunto, os trabalhos propõem um percurso que parte de questões ambientais e territoriais amplas e avança em direção ao funcionamento dos agroecossistemas, às estratégias de produção sustentável e às transformações históricas das relações entre agricultura, recursos e paisagem.

O primeiro eixo reúne estudos voltados às mudanças ambientais, à vulnerabilidade territorial, à soberania alimentar e à conservação de áreas naturais. As análises destacam como clima, uso da terra, planejamento territorial, políticas de desenvolvimento e participação comunitária interferem diretamente na relação entre sociedade e ambiente. A vulnerabilidade de áreas costeiras diante da elevação do nível do mar, por exemplo, envolve não apenas fatores físicos, mas também infraestrutura, uso do solo, planejamento e capacidade adaptativa. Da mesma forma, a soberania alimentar é discutida a partir das disputas pelo território, pela terra e pela água e das diferentes formas de organização da produção rural.

No segundo eixo, o olhar se volta ao solo, à biodiversidade e ao funcionamento dos agroecossistemas. A agricultura regenerativa é apresentada como uma abordagem sistêmica voltada à recuperação da saúde e da funcionalidade do solo, com princípios relacionados à redução da perturbação, à cobertura permanente, à diversidade e à integração planejada entre componentes do sistema produtivo. Os estudos sobre fungos micorrízicos, bactérias rizosféricas e recursos fitogenéticos ampliam essa discussão ao abordar diferentes dimensões da biodiversidade e de sua importância ecológica. As interações entre organismos e solo, a participação de microrganismos nos processos de transformação da matéria orgânica e a conservação da diversidade vegetal evidenciam a relevância dos recursos biológicos para o funcionamento dos ecossistemas e para o desenvolvimento de estratégias de conservação e uso sustentável.

O terceiro eixo aborda diferentes estratégias de aprimoramento dos sistemas produtivos, considerando aspectos técnicos, ecológicos e organizacionais. São discutidas alternativas como a utilização de microrganismos benéficos para reduzir a dependência da fertilização mineral, o emprego de alimentos vivos na aquicultura, o comportamento e o manejo de bovinos autóctones em sistemas extensivos de montanha e formas coletivas de organização e comercialização entre pequenos produtores. Os trabalhos demonstram que a sustentabilidade da produção depende não apenas da eficiência no uso dos recursos, mas também da adequação das práticas de manejo, da conservação da paisagem e das condições de organização econômica e social dos produtores.

Por fim, o quarto eixo estabelece um diálogo entre aproveitamento de recursos, transformação ambiental e história da agricultura. O estudo sobre a utilização da casca de noz para a produção de carvão ativado examina os requisitos técnicos e de investimento associados à valorização de resíduos agroindustriais, em consonância com os princípios da economia circular. Os dois capítulos seguintes ampliam a perspectiva temporal ao investigar as relações entre agricultura, clima, desmatamento e transformações sociopolíticas nas terras baixas maias, bem como os conhecimentos, as tecnologias de manejo da água e as intervenções sobre a paisagem desenvolvidos no contexto da agricultura andina e inca. Em conjunto, esses trabalhos permitem considerar diferentes formas de utilização e transformação dos recursos naturais, desde experiências históricas de organização agrícola até propostas contemporâneas de valorização de materiais e processos produtivos.

A diversidade dos capítulos reunidos neste volume evidencia que os desafios ambientais e agrícolas contemporâneos não podem ser compreendidos de forma isolada. Solo, água, biodiversidade, território, produção, tecnologia e organização social constituem dimensões interdependentes de sistemas em constante transformação.

Ao integrar estudos sobre conservação, sustentabilidade, produção e história da agricultura, este volume contribui para ampliar o debate sobre formas mais equilibradas de relação entre sociedade, sistemas produtivos e ambiente, valorizando tanto a inovação científica quanto o conhecimento acumulado ao longo do tempo.

Boa leitura!

Eduardo Eugênio Spers

SUMÁRIO

TERRITÓRIO, MUDANÇAS AMBIENTAIS E CONSERVAÇÃO

CAPÍTULO 1..... 1

VULNERABILITY DUE TO RISING SEA LEVELS IN THE COLOMBIAN CARIBBEAN

Johan Andrés Avendaño Arias
Leonardo Santana Bohorquez
Ivan Dario Camacho Puerto
Gustavo Enrique Ramírez Gómez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263211

CAPÍTULO 2..... 33

CONFIGURACIÓN TERRITORIAL DE LA SOBERANÍA ALIMENTARIA: EXPLORANDO LAS TERRITORIALIDADES RURALES EN FONSECA, COLOMBIA

Elkis Peñaranda Pinto

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263212

CAPÍTULO 3..... 50

CREACIÓN Y DESARROLLO DE UN CENTRO DE PROMOCIÓN AMBIENTAL MATLALCUÉYATL PARA LA RECUPERACIÓN Y CONSERVACIÓN DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS: CASO: ZITLALTEPEC, TLAXCALA, MÉXICO

Fernando Mohedano López

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263213

SOLO, BIODIVERSIDADE E AGROECOSSISTEMAS SUSTENTÁVEIS

CAPÍTULO 4..... 65

AGRICULTURA REGENERATIVA: PRINCIPIOS Y PRÁCTICAS PARA RECUPERAR EL SUELO Y FORTALECER LOS AGROECOSISTEMAS

Benigno Rivera-Hernández
José Jesús Obrador-Ólán
Eustolia García-López
José Francisco Juárez-López
Eugenio Carrillo-Ávila

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263214

CAPÍTULO 5..... 81

FUNCTIONAL ROLE OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN AGGREGATE FORMATION, BIODIVERSITY, AND EDAPHIC FUNCTIONING

Sud Sair Sierra

Raúl Hernando Posada

Johanna Santamaría

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263215

CAPÍTULO 6..... 108

ASLAMIENTO DE BACTERIAS DEGRADADORAS DE LIGNINA DE SUELO RIZOSFERICO DE *QUERCUS SPP.*

Iván Hernández Portillo

Yadira Cornejo Silva

María Yolanda Ríos Gómez

Ramiro Ríos Gómez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263216

CAPÍTULO 7..... 115

PHYTOGENETIC RESOURCES OF THE GENUS *Lupinus* IN BAJA CALIFORNIA: EXPLORATION AND *in situ* CHARACTERIZATION STRATEGIES

Guadalupe Minerva Torres Alfaro

María Nancy Herrera-Moreno

Jesús Alicia Chávez-Medina

Kalina Bermúdez Torres

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263217

PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL, MANEJO E ORGANIZAÇÃO DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

CAPÍTULO 8..... 120

MICROORGANISMOS BENEFICIOSOS COMO ESTRATEGIA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN MINERAL EN EL CULTIVO DE ARROZ EN UN SUELO DE BAJA OFERTA NUTRICIONAL

Eliecer Miguel Cabrales Herrera

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263218

CAPÍTULO 9.....139

THE GREAT UNKNOWN: USE OF LIVE FOOD IN AQUACULTURE

Marco Polo Franco Archundia

Héctor Eduardo Franco-Cotero

Jimena Ramos

Luis Ángel Fabro-Leal

Fátima Getsemaní Osorio-Arce

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2509263219

CAPÍTULO 10 150

COMPORTAMENTO E MANEIO DE BOVINOS AUTÓCTONES NAS MONTANHAS DO NORTE DE PORTUGAL

Marco André de Almeida Fernandes

Gustavo Paixão

Joaquim Lima Cerqueira

José Pedro Araújo

 https://doi.org/10.37572/EdArt_25092632110

CAPÍTULO 11.....167

REMATE GANADERO DE PEQUEÑOS PRODUCTORES: MÉTODO DE EVALUACIÓN FODA

Félix Cavour Ferrari

María Elena Fretes

José Braulio Silvero

 https://doi.org/10.37572/EdArt_25092632111

ECONOMIA CIRCULAR, TRANSFORMAÇÕES AMBIENTAIS E HISTÓRIA DA AGRICULTURA

CAPÍTULO 12 175

INVERSIÓN TÉCNICA PARA LA ELABORACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE NUEZ EN DELICIAS, CHIHUAHUA

Marina Imelda Terrazas Gómez

Luisa Patricia Uranga Valencia

Sandra Pérez Álvarez

Víctor Hugo Villarreal Ramírez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_25092632112

CAPÍTULO 13187

¿LA AGRICULTURA DESTRUYÓ A LOS MAYAS? SEQUÍAS, DEFORESTACIÓN Y COLAPSO EN LAS TIERRAS BAJAS MAYAS

Humberto Álvarez Sepúlveda

 https://doi.org/10.37572/EdArt_25092632113

CAPÍTULO 14 200

¿CULTIVARON LOS INCAS EN EL DESIERTO? AGRICULTURA, AGUA Y TRANSFORMACIÓN DEL PAISAJE EN EL IMPERIO INCA

Humberto Álvarez Sepúlveda

 https://doi.org/10.37572/EdArt_25092632114

SOBRE O ORGANIZADOR.....212

ÍNDICE REMISSIVO213

CAPÍTULO 1

VULNERABILITY DUE TO RISING SEA LEVELS IN THE COLOMBIAN CARIBBEAN

Data de submissão: 01/09/2026

Data de aceite: 16/09/2026

Johan Andrés Avendaño Arias

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Bogotá D.C., 111321
Bogotá D.C., Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-7193-2070>

Leonardo Santana Bohorquez¹

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Bogotá D.C., 111321
Bogotá D.C., Colombia
<https://orcid.org/0009-0007-2070-5971>

Ivan Dario Camacho Puerto

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Bogotá D.C., 111321
Bogotá D.C., Colombia
<https://orcid.org/0009-0004-7211-4274>

Gustavo Enrique Ramírez Gómez

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Bogotá D.C., 111321
Bogotá D.C., Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-5710-974X>

ABSTRACT: The coastal systems of the Colombian Caribbean face various threats from climate change, including sea level rise

¹ Corresponding author

(SLR), projected at 18 centimeters by 2040. This phenomenon, together with flooding, loss of ecosystems, and damage to infrastructure, increases vulnerability in coastal zones. This study evaluates the physical vulnerability to SLR in Cartagena, Coveñas, Ciénaga and Manaure, from the perspective of sensitivity and adaptive capacity. Factors such as building material, land use, road connection, public services, topography, and elements of adaptive capacity such as land use planning, resource performance, and infrastructure resilience were analyzed. Data on appraisals, cadastre, land use, economic activities and population were used, as well as the Land Management Plans and Municipal Development Plans. The results show that in Cartagena, 17,430 buildings are at risk, of which 2,187 are highly vulnerable. In Ciénaga, 1,892 properties are threatened, with 1,510 in very high vulnerability. In Coveñas, 1,027 buildings are exposed, of which 302 are highly vulnerable. In Manaure, 748 buildings are at risk, with 469 in very high vulnerability. In economic terms, it is estimated that losses associated with SLR would represent 36.5% of the total value of properties in Cartagena, 4.2% in Ciénaga, 37.5% in Coveñas and 31.7% in Manaure. The economic activities with the greatest number of properties exposed to SLR are residential, commercial, tourism, and institutional.

KEYWORDS: vulnerability; coastal flooding; climate change; cadastral; impacts; Colombian Caribbean.

VULNERABILIDAD ANTE EL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR EN EL CARIBE COLOMBIANO

RESUMEN: Los sistemas costeros del Caribe Colombiano enfrentan diversas amenazas derivadas del cambio climático, entre ellas el ascenso del nivel del mar (SLR), el cual para 2040, está proyectado ascienda 18 centímetros. Este fenómeno desencadenará inundaciones, que afectarán tanto los ecosistemas terrestres como la infraestructura existente incrementando así la vulnerabilidad de las zonas costeras. Este estudio se evaluó la vulnerabilidad física al SLR en los municipios de Cartagena, Coveñas, Ciénaga y Manaure, basado en la perspectiva de la sensibilidad y la capacidad de adaptación. Se analizaron factores como el material constructivo, uso del suelo, conexión vial, servicios públicos, topografía y elementos de la capacidad adaptativa como el ordenamiento territorial, la ejecución de recursos y la resiliencia de la infraestructura. Se utilizaron datos de avalúos, catastro, uso del suelo, actividades económicas y población, así como los Planes de Ordenamiento Territorial con el fin de evidenciar el impacto a nivel económico del SLR. Los resultados muestran que, en Cartagena, 17,430 edificaciones están en riesgo, de las cuales 2,187 presentan alta vulnerabilidad. En Ciénaga, 1,892 predios están amenazados, con 1,510 en muy alta vulnerabilidad. En Coveñas, 1,027 construcciones están expuestas, de las cuales 302 son altamente vulnerables. En Manaure, 748 edificaciones están en peligro, con 469 en muy alta vulnerabilidad. En términos económicos, se estima que las pérdidas asociadas al SLR representarían el 36.5% del valor total de las propiedades en Cartagena, el 4.2% en Ciénaga, el 37.5% en Coveñas y el 31.7% en Manaure. Las actividades económicas con mayor cantidad de predios expuestos al SLR son residencial, comercial, turística e institucional.

PALABRAS CLAVE: vulnerabilidad; inundación costera; cambio climático; catastro; impactos; Caribe Colombiano.

1. INTRODUCTION

Currently, coastal systems are particularly sensitive to phenomena associated with climate change such as sea level rise (SLR²), marine acidification, changes in sea surface temperature -SST- and coastal erosion (Hernández-Narváez et al., 2019; Martínez & Zavala, 2011). Among these, SLR is a phenomenon related to global warming produced by two main factors: thermal expansion and melting of glaciers and ice sheets (IDEAM, 2018; Sinha et al., 2023). Among its effects are the loss of urban and beach areas, ecosystem impacts, displacement of communities or changes in the distribution areas of species, impacts on infrastructure and economic activities, exacerbating vulnerability, poverty and local inequalities (IDEAM et al., 2017; Monsalves, Pincheira-Ulbrich, & Rojo 2013).

In the framework of the understanding of risk promoted by the Intergovernmental Panel on Climate Change -IPCC- (2014), sensitivity indicates to what degree and in what

² In a broader definition, SLR is the change in global or local sea level height on seasonal, annual, or longer time scales due to changes in ocean volume as a result of changes in the mass or density of ocean water, as well as changes in the shape of ocean basins and changes in the Earth's gravitational and rotational fields IPCC (2019).

way coastal systems, made up of institutions, people, economic activities, infrastructure or ecosystems, are affected by climate change, and particularly SLR. This concept, together with the adaptive capacity to respond, reduce and adjust to the affectations produced (IPCC, 2014), allows understanding the vulnerability of systems. Therefore, vulnerability is the predisposition of the system to be negatively affected due to its exposure³, given mainly between sensitivity and adaptive capacity (IDEAM, 2017b). However, this concept has been approached from an economic, social, institutional and physical perspective, among others; placing it in a polysemic, multidimensional and multiscale concept as proposed by Michellier et al. (2020).

Considering the socioeconomic and environmental implications of SLR, vulnerability studies are valuable inputs for decision making in terms of adaptation, mitigation and knowledge management of climate change in coastal cities, as well as economic development and planning of these areas (Díaz-García et al., 2020). The Third National Climate Change Communication (Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático, TCNCC) of Colombia considers, based on projections of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) and the scenario of maximum greenhouse gas emissions (RCP 8.5), a rise in the average sea level of about 18 cm by 2040, 29 cm by 2070 and 40 cm by 2100. (IDEAM et al., 2017).

In the Colombian Caribbean, this scenario for 2040 implies the most critical flooding due to the rise in areas where strategic ecosystems such as mangroves and swamps are located (IDEAM et al., 2017b); as well as major and intermediate cities of the country's urban system, such as Barranquilla, Cartagena, Santa Marta, Riohacha, San Andrés, Turbo, Manaure, Ciénaga, Coveñas and Puerto Colombia: recognized as important demographic, economic and political-administrative nuclei on a national and regional scale. These coastal cities and communities currently face a wide range of challenges related to disaster events and climate change.

Studies on the impact of the SLR in the Colombian Caribbean are varied, including evaluations from a risk approach (Rangel-Buitrago & Posada-Posada, 2013; Hernández-Narváez et al., 2019); multidimensional analysis of vulnerability, for example, in its coastal dimension (García Echavarría, Alcántara-Carrió, & Jaramillo, 2022), political-administrative (Guardela Contreras, 2023) or in its infrastructure (Hamburguer Cárdenas & Ramírez Molina, 2023); as well as in the estimates of the impacts generated such as erosion (Echeverry & Marriaga, 2018); flooding and extreme waves (Orejarena-Rondón, 2019),

³ According to IPCC (2014), exposure is the presence of people, livelihoods, species or ecosystems, environmental services and resources, infrastructure, or economic, social or cultural assets in locations that could be adversely affected.

loss of strategic ecosystems such as mangroves (Herrera Carmona et al. , 2024) and its effects on the tourism and hotel industry (Jaramillo Rodríguez, Mejía Ayala & Lamprea Quiroga, 2024).

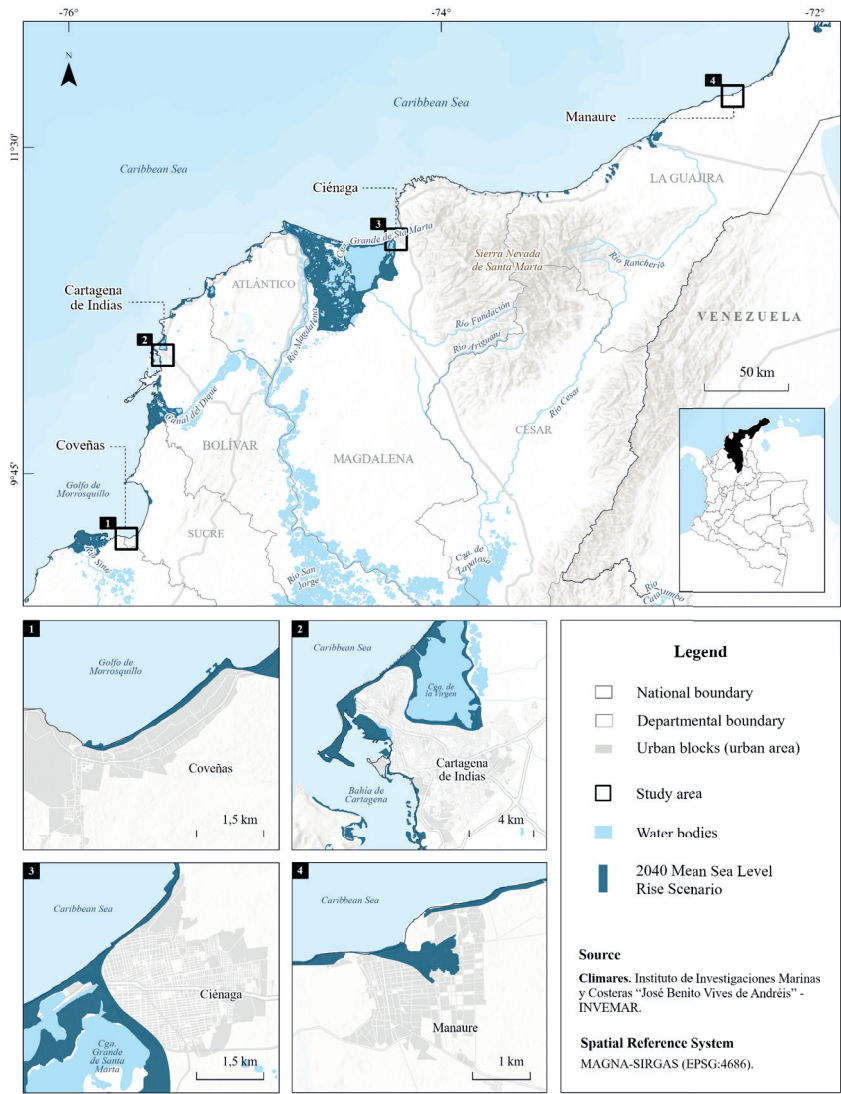
These studies as a whole show a high sensitivity of the Colombian Caribbean to SLR; however, there have been few studies involving the physical vulnerability of coastal areas based on the structural conditions of housing and the state of the environment. This is relevant because this region is exposed to hazards of hydrometeorological and hydroclimatic origin, which, in a combined effect with SLR, amplify their impact, such as storm surges, storms, strong winds and rains, floods and coastal erosion. In recent years, these hazards have brought emergencies with consequences in loss of housing and road infrastructure, displacement of people, effects on economic activities, social mobilization, among others (Mejía, 2024; El Informador, 2024; W Radio, 2023; Caracol Radio, 2020; Vivas, 2019; Torrado, 2018; El Colombiano, 2011; Semana, 2010).

To address physical vulnerability studies, cadastre information on architectural, physical and environmental characteristics and the use of buildings is a reliable, accurate and open source of information for the development of planning and adaptation strategies for SLR and risk scenarios (Van der Molen, 2009; Belmonte et al., 2011). In this sense, this article aims to identify the physical vulnerability caused by SLR in the year 2040 in four cities of the Colombian Caribbean coast: Cartagena de Indias, Coveñas, Ciénaga and Manaure. The article is organized in four parts. The first deals with the study area and the exposure scenario, followed by an explanation of the methodology, based on an understanding of vulnerability, as well as the variables, sources and calculations used. The third part presents the results of physical vulnerability and expected impacts. Finally, the fourth part delves into conclusions, discussions and future areas of research.

2. STUDY AREA

The study area covers four municipalities in the Colombian Caribbean, selected for their heterogeneous social dynamics, which allows different contexts to be addressed in relation to SLR. The following is a map showing the location of the municipalities (see Figure 1) and a presentation of each of them. Cartagena de Indias, located in the Colombian Caribbean, stands out as a tourist and strategic destination thanks to its seaport and the Cartagena refinery (COSALFA, n.d.). With a projected population of 1,059,626 people by 2024, it faces a housing deficit of 95,663 homes, and 43.6% of its inhabitants live in moderate poverty (Cartagena Cómo Vamos, 2023).

Figure 1. Location map of the municipalities.



Ciénaga, located in the department of Magdalena, faces multiple challenges related to its geographic location and socioeconomic conditions. Its exposure to flooding and tropical storms, together with the high incidence of poverty and limitations in basic services, aggravates its vulnerability to SLR. In addition, factors such as violence and internal displacement further aggravate the difficulties in the municipality (REACH Initiative, 2023).

Coveñas is in the Caribbean region and the Gulf of Morrosquillo, with a population of approximately 17,091 people (DANE, 2018), it faces serious limitations in terms of

access to basic services, such as sewerage (28.8%) and natural gas (49.9%). Its economy depends mainly on tourism, manufacturing and fishing (Gobernación de Sucre, EPI, & Fondo Mixto para la Promoción de la Cultura y las Artes, 2023).

Finally, Manaure, in the region of Media Guajira, Colombia, has a population of 74,528 inhabitants (DANE, 2018), of which 8,032 reside in its urban area. Its economy is centered on salt production, artisanal fishing and a growing tourism (Alcaldía Municipal de Manaure, 2016).

The analysis of these municipalities is fundamental, as they represent contrasting realities where economic, social, environmental, physical vulnerabilities converge, as well as those related to the institutional capacity for their management. Their exposure to sea level rise (SLR), added to their structural and economic conditions, evidences the urgency of understanding how this phenomenon compromises their local dynamics and threatens their sustainable development strategies.

3. MATERIALS

To delimit the areas potentially exposed to sea advance and establish a baseline to assess the impact of SLR, the SLR projection generated for the Third National Climate Change Communication (TCNCC) was used, based on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) projections and the high emissions scenario RCP 8.5 or inactions. This scenario, also known as climate inaction, projects a global sea level rise of approximately 18 cm by 2040 (IDEAM et al., 2017b).

Regarding population data, the spatial information of the blocks of the National Geostatistical Framework of the National Administrative Department of Statistics (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE) of the 2018 census was used. To estimate the possible economic losses of the properties, the current threatened uses and the physical sensitivity of vulnerable buildings, we used the cadastral data available from the Agustín Codazzi Geographic Institute (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC), specifically for buildings, properties and physical homogeneous zones for the years 2020 to 2024, since they are an official source and also the most detailed source of real estate in the country.

In addition, data from the Municipal Performance Measurement Index, developed by the National Planning Department (Departamento Nacional de Planeación, DNP) for the year 2021, were used to evaluate the current capacities of the municipalities in the face of SLR. Documents such as Land Management Plans and Municipal Development Plans were also reviewed to construct a Municipal Adaptation Index, which made it possible to evaluate the capacities of the territories in the face of sea level rise.

4. METHODS

Two main approaches to climate change vulnerability assessment can be identified: outcome vulnerability, which focuses on residual impacts following adaptation processes (Kelly & Adger, 2000; O'Brien et al., 2007), and contextual vulnerability, which examines the current capacities of systems to cope with external pressures within contexts of social, economic, and environmental inequality (O'Brien et al., 2007). This study adopts the latter perspective because, as noted by Petrone-Mendoza et al. (2024), it allows the incorporation of structural factors that condition territorial responses to SLR.

The Fifth Assessment Report (AR5) of the IPCC (2014) establishes that climate risk results from the interaction among hazard, exposure, and vulnerability. Within this framework, vulnerability is defined as the *propensity or predisposition to be negatively affected* and includes two components: sensitivity and adaptive capacity (IPCC, 2014, p. 5). Following this conceptualization, the present study focuses exclusively on physical vulnerability, understood as the susceptibility of the built environment and buildings to sustain damage due to SLR.

To identify potentially affected areas, the official projection developed for the Third National Communication on Climate Change (IDEAM et al., 2017b) was used. It is based on CMIP5 projections under the RCP 8.5 scenario and estimates an increase of 18 cm by 2040. This layer constitutes the spatial reference for identifying buildings located in susceptible areas. All spatial procedures were carried out using geographic information systems (GIS).

The vulnerability formula is presented below, followed by a detailed description of each component of physical vulnerability.

$$Vulnerability\ to\ climate\ change = \frac{Sensibility}{Adaptative\ capacity}$$

To assess vulnerability, the values of each component were previously standardized on a common scale from 0 to 1, which ensured comparability between variables. Subsequently, the results were classified on an ordinal scale from 1 to 5, representing increasing levels of impact: very low, low, medium, high and very high. This classification was carried out using the quintile method.

4.1. SENSIBILITY

The IPCC (2014) defines sensitivity as the degree to which a system may be affected, either adversely or beneficially, by climate variability or change. In this study, physical sensitivity was operationalized using the Physical Homogeneous Zones (ZHF) developed by the Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), which were used as an input for the physical and economic characterization of properties. ZHF allow areas with relatively homogeneous characteristics to be grouped and, consequently, differences among properties to be established according to their construction conditions and immediate surroundings (IGAC, 2024).

The estimation of physical sensitivity considered two components: the construction conditions of buildings and the physical and urban conditions of the immediate surroundings. The first was represented by the *Physical Conditions of Construction* (PCC) indicator, derived from the Construction Typification (TC), while the second was represented by the *Physical Conditions of the Environment* (PCE) indicator, derived from the last two digits of the ZHF code.

Physical Conditions of Construction (PCC)

ZHF are identified by a three-digit code. The first digit corresponds to the Construction Typification (TC), an ordinal classification ranging from 1 to 6 that differentiates buildings according to their construction, architectural, and material characteristics. In this study, this classification was used as an approximation of the construction conditions that may contribute to the physical sensitivity of properties to climate change-related effects. This assumption is consistent with the literature indicating that material and construction conditions can influence the susceptibility of buildings to climate and environmental hazards (IPCC, 2014; Rufat et al., 2015; Tate, 2013; Jha et al., 2021).

To incorporate this classification into the sensitivity index, the ordinal TC scale was transformed to an interval between 0 and 1 using min-max normalization. The scale was subsequently inverted to orient the indicator toward physical sensitivity. The expressions used were:

$$TC_{\text{norm}} = \frac{TC - TC_{\text{min}}}{TC_{\text{max}} - TC_{\text{min}}}$$

$$PCC_{\text{norm}} = 1 - TC_{\text{norm}}$$

where (TC) corresponds to the Construction Typification category assigned to the property, while TCmin and TCmax correspond to the lower and upper limits of the classification used. Thus, the transformation can be expressed directly as:

$$TC_{\text{norm}} = \frac{TC - 1}{6 - 1}$$

The first expression transforms the original TC scale to an interval between 0 and 1, while the second reverses its orientation so that higher PCC values represent relatively less favorable construction conditions and, therefore, greater physical sensitivity.

Consequently, a category of TC=1 obtains a PCC value of 1, whereas a category of TC=6 obtains a PCC norm value of 0. Thus, the transformation preserves the order of the original classification while reversing its orientation so that higher values represent higher relative levels of sensitivity.

This transformation does not imply that differences between TC categories represent linear differences in physical sensitivity. Its purpose is to standardize and orient the classification for incorporation into the composite index. Therefore, PCC is interpreted in relative terms within the construction-condition classification used by the ZHF.

Physical Conditions of the Environment (PCE)

The second component corresponds to the physical and urban conditions of the property's immediate surroundings. This component was derived from the second and third digits of the ZHF code, which represent the classification assigned to the conditions of the surrounding environment.

Based on this coding, the Physical Conditions of the Environment (PCE) indicator was constructed. Since the values of this classification are coded from 00 to 99, min-max normalization was applied over the complete range:

$$PCE_{\text{norm}} = \frac{PCE - 0}{99 - 0}$$

where (PCE) corresponds to the value formed by the last two digits of the ZHF code. The transformation allows the values of this classification to be expressed on a common scale between 0 and 1 while preserving their relative position within the range used. Thus, the lowest and highest classification values are located at the lower and upper ends of the normalized scale, respectively.

The transformation does not seek to assign an absolute physical meaning to the numerical difference between categories, but rather to rescale the existing coding so

that it can be compared with the construction-condition indicator. Therefore, PCE norm is interpreted in relative terms and according to the environmental classification established in the ZHF.

Finally, the construction-condition and environmental indicators were integrated to obtain the physical sensitivity index (S). An equal weight was assigned to each component, considering that construction conditions and environmental conditions represent complementary dimensions of physical sensitivity:

$$S = 0.5 \cdot PCC_{\text{norm}} + 0.5 \cdot PCE_{\text{norm}}$$

Thus, the (S) index ranges from 0 to 1, where higher values represent higher relative levels of physical sensitivity, derived from the combination of the construction and environmental conditions characterized through the ZHF.

This procedure simultaneously integrates construction conditions and immediate environmental conditions, allowing relative differences in physical sensitivity associated with the material and urban conditions of properties and their surrounding areas to be identified. Given the absence of a standardized methodology for establishing differentiated weights between these two components, an equal weighting of 0.5 was adopted for each component, without assigning greater influence to either dimension in the absence of a specific empirical basis.

4.2. CAPACITY ADAPTATIVE

Adaptive capacity is defined as “the ability of systems, institutions, humans and other organisms to adjust to potential damages, take advantage of opportunities or respond to consequences” (IPCC, 2014, p. 1758). In this study, adaptive capacity was characterized using the Municipal Development Measurement Index (MDM), prepared by the National Planning Department. The MDM provides standardized information on municipal management and institutional performance, allowing differences in the capacities available at the municipal level to be incorporated into the vulnerability assessment.

The analysis focused on the Management component of the MDM, which includes aspects related to the mobilization of own resources, budget execution, open government and transparency, and the use of land-use planning tools (Table I). These aspects provide a general characterization of the institutional and management conditions that may support the capacity of municipalities to respond to external pressures.

Because the MDM reflects conditions observed during the reference period, it was used as a baseline of municipal adaptive capacity rather than as a projection of future institutional conditions. The study therefore does not attempt to predict the decisions, investments, or adaptation measures that municipalities may implement by 2040, as these cannot be established from the projected SLR scenario. Instead, the analysis combines the projected 2040 SLR scenario with the best available characterization of current municipal capacities.

Municipal Development Measurement Index

The MDM, prepared by the National Planning Department, measures municipal performance in terms of management and development. In this analysis, priority was given to the Management component, whose specific characteristics are detailed in Table I.

Table I. Aspects Evaluated in the MDM.

Aspect Evaluated	Description
Mobilization of own resources	Assessment of resources generated at the municipal level through taxes such as property tax or valuation and their investment.
Execution of budgeted resources	Measures the efficiency in executing the budget allocated to municipal projects.
Open government and transparency	Evaluates activities related to citizen services, transparency, and participatory accountability.
Use of land-use planning tools	Analyzes how the administration uses planning instruments to generate revenue, such as urban planning.

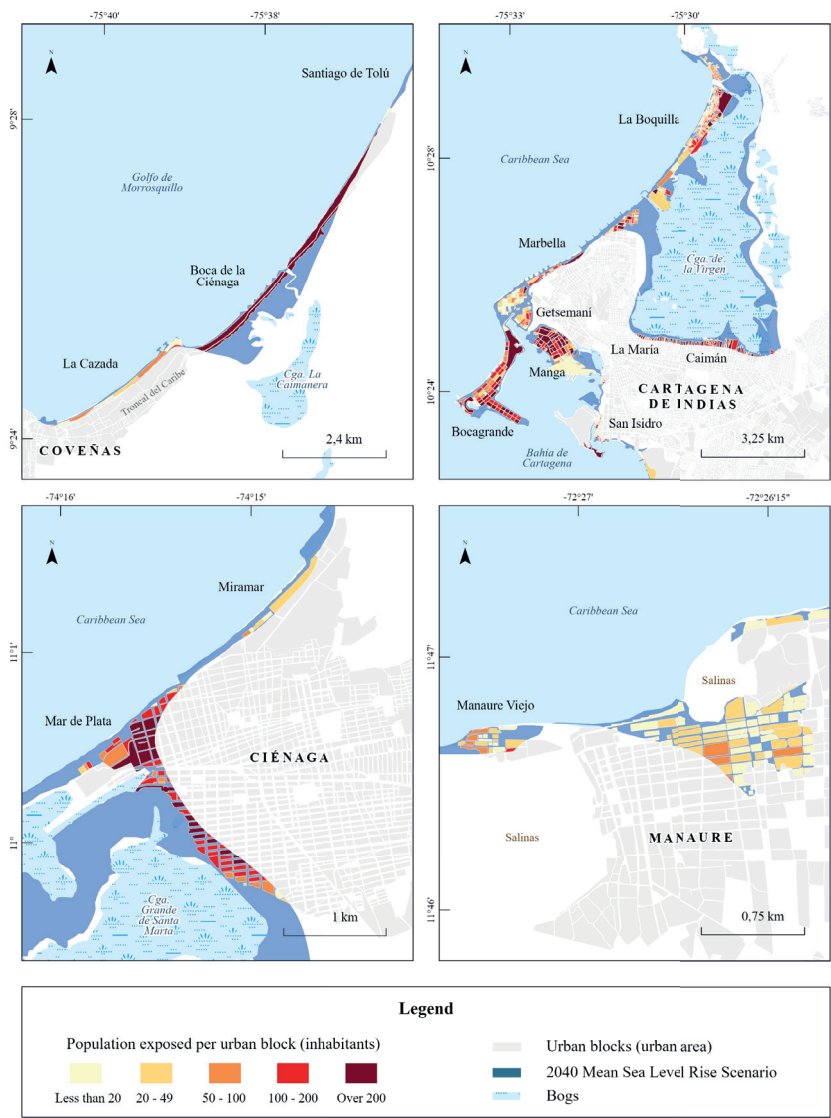
Accordingly, the MDM was used to characterize municipal adaptive capacity from an institutional and management perspective. The resulting assessment should be interpreted as a representation of the capacities available during the reference period under the projected 2040 SLR scenario, rather than as a prediction of future municipal capacity.

5. RESULTS

5.1. SOCIOECONOMIC AND PHYSICAL EXPOSURE TO SLR

5.1.1. Population exposed to SLR

Figure 2. Population per block exposed to SLR 2040.



Note. Own elaboration with data from DANE, National Population and Housing Census 2018.

Figure 2 shows the distribution of population density in each city. In Cartagena, the neighborhoods south of the Ciénaga de la Virgen, as well as Bocagrande and Manga, have high densities, reaching up to 860 people per block. In Ciénaga, density is higher in the central core, particularly in commercial areas, and decreases towards the peripheries. In Coveñas, the peripheral areas along the tourist axis show higher density, while the municipal core has a lower density. Manaure, on the other hand, has a moderate and dispersed density without significant population concentrations.

According to Table II, the proportion of population exposed to SLR projected for 2040 varies among the municipalities analyzed. Manaure has the highest percentage of exposed population with 21.6%. It is followed by Coveñas, with 19.8% of its population exposed. In Ciénaga, the percentage is lower, reaching 13.8%. Cartagena, despite having the largest total population, has the lowest percentage, with 9.1% of its population at risk.

Table II. Exposed urban population in relation to the total.

Municipality	Exposed population	Total urban population	Percentage of exposed people
Coveñas	2,377	11,993	19.8%
Ciénaga	15,057	109,106	13.8%
Manaure	2,448	11,334	21.6%
Cartagena	78.844	868.657	9.1%

Note. Prepared by the authors with data from DANE, National Population and Housing Census 2018.

5.1.2. Exposure of Constructions to SLR

According to the analysis of buildings exposed to SLR projected for 2040, presented in Table V, Coveñas stands out with the highest percentage of exposed buildings, reaching 34.5% of its infrastructure at risk. It is followed by Manaure with 26.0%, while Ciénaga and Cartagena present lower percentages, with 7.9% and 7.8%, respectively. These data underscore the variability in the structural vulnerability of the municipalities with respect to the projected SLR. In addition, in terms of building density, a pattern of concentration toward urban centers is observed, while the peripheries show a more dispersed distribution.

Table III. Number of urban buildings exposed in relation to the municipal total.

Municipality	Exposed buildings	Total buildings	Percentage of exposed buildings
Coveñas	2,033	5,891	34.5%
Ciénaga	1,892	24,037	7.9%

Municipality	Exposed buildings	Total buildings	Percentage of exposed buildings
Manaure	695	2,677	26.0%
Cartagena	17.430	223.237	7.8%

Note. Prepared by the authors with cadastral information from IGAC (2020-2023).

Table VI shows the number of buildings exposed to SLR projected for 2040 by neighborhood in Cartagena de Indias. It is observed that the neighborhoods with the most exposed buildings are Manga (3,957), La Boquilla (3,024) and Bocagrande (2,544), while those with the least number of exposed buildings are La María (4) and San Isidro (1). Although complete information was not available for other municipalities, it was decided to present this analysis at the neighborhood level for Cartagena to demonstrate how the available data allows for a detailed spatial analysis.

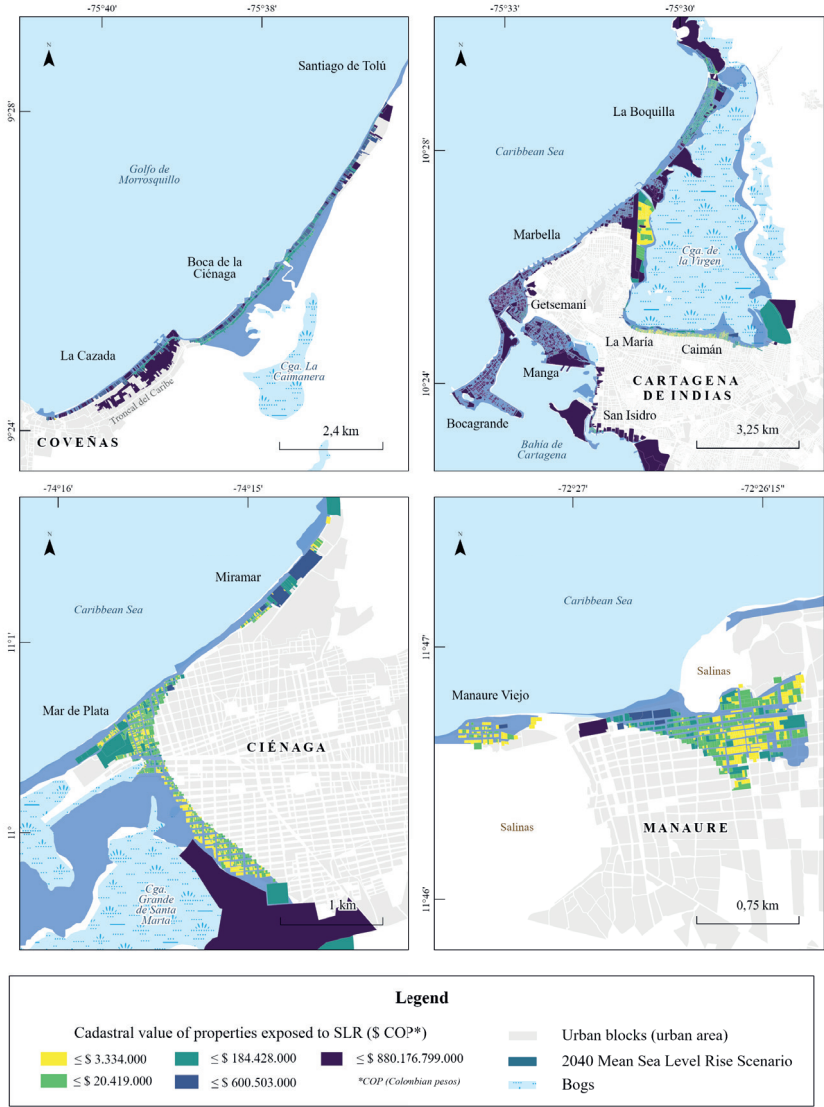
Table IV. Number of buildings exposed by neighborhood in Cartagena de Indias.

Neighborhood	Number of Buildings	Neighborhood	Number of Buildings
Manga	3,957	Olaya St. Central	208
La Boquilla	3,024	El Laguito	207
Bocagrande	2,544	El Cabrero	145
Centro	924	Pasacaballos	81
Getsemaní	915	Punta Arenas	73
Castillogrande	852	Leticia	69
Crespo	671	Olaya St. Progreso	56
San Diego	650	Zona Industrial	54
Olaya St. Rafael Núñez	435	Punta Canoa	41
República del Líbano	404	Albornoz	31
Arroyo de Piedra	304	Olaya St. Playa Blanca	23
La Matuna	277	Olaya St. La Puntilla	11
El Bosque	263	Fredonia	10
Marbella	254	La Esperanza	4
Boston	245	La María	4
Olaya St. Ricaurte	243	Olaya St. Zarabanda	1
Olaya St. 11 de Noviembre	214	San Isidro	1
La Candelaria	212		

Note. Prepared by the authors with cadastral information from IGAC (2020-2023) and MIDAS data from the Mayor's Office of Cartagena.

5.1.3. Economic estimation of losses of properties exposed to SLR

Figure 3. Cadastral value of properties exposed to SLR.



Note. Own elaboration with cadastral information from IGAC (2020-2023).

Figure 3 shows the distribution of cadastral values in the four study cities. In Cartagena de Indias, the properties with the highest cadastral values are located mainly along the coast, which is explained by the interaction of human activities with the sea. In these areas, tourism, hotel, recreational, institutional and port activities, among others, are developed. In contrast, in the southern zone of the Ciénaga de La Virgen, human

settlements have lower cadastral values compared to the areas previously analyzed, and residential uses predominate.

In Ciénaga, the distribution of cadastral values varies among the lower property value classes, showing a slight downward trend towards recently developed urban areas. For Coveñas, cadastral values are distributed along the coastline, which can be attributed to the attractiveness of its tourist zones and the boost that the sector has had in this area. Finally, in Manaure, there is a concentration of the highest cadastral values in the center of the municipality, corresponding to the most consolidated area, while values decrease towards the peripheries in the process of growth.

Table V is key in showing the economic value of areas potentially threatened by SLR in the cities analyzed. This information provides an estimate of the possible economic losses, both of land and buildings. It is important to note that the cadastral appraisals provided by the IGAC, based on its methodology, do not exceed 60% of the commercial value of the properties, which indicates that the real economic impact could be greater than that estimated in this analysis.

Table V. Cadastral value of land potentially exposed to SLR by 2040.

City	Total Appraisal (COP)	Appraisal of Land Exposed to SLR (COP)	Percentage (%)
Cartagena de Indias	28.35 trillion	10.36 trillion	36.5
Coveñas	536.91 billion	201.50 billion	37.5
Ciénaga	296.24 billion	12.38 billion	4.2
Manaure	28.33 billion	8.98 billion	31.7

Note: Prepared by the authors with cadastral information from IGAC (2020-2023).

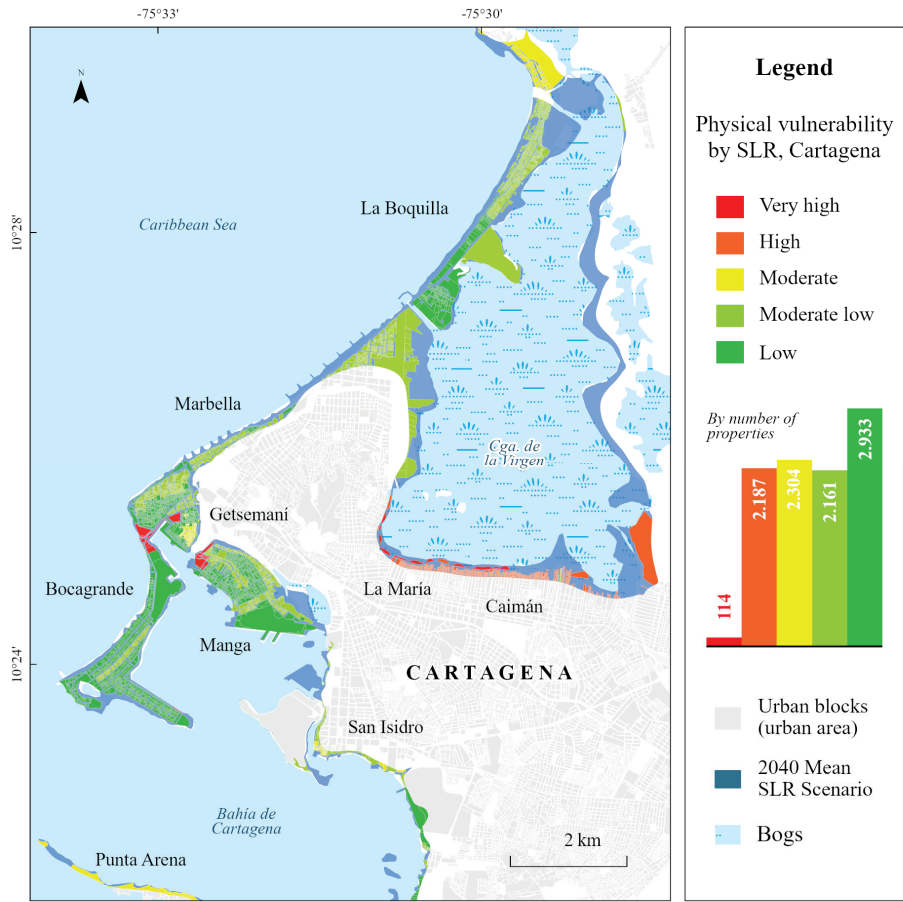
5.2. PHYSICAL VULNERABILITY DUE TO RISING SEA LEVELS

5.2.1. Cartagena de Indias

The analysis of physical vulnerability to SLR in the municipality reveals that 9,699 properties (6.1%) are at risk. As shown in Figure 4, most of the settlements near the coastline have low or moderate-low vulnerability. This is attributed to their older urban consolidation, which gives them better coverage of public services, road infrastructure and an important economic activity linked to tourism and the seaport. However, isolated cases of high vulnerability were identified in sectors such as La Boquilla and Manga, possibly linked to inconsistencies in cadastral assignments.

In contrast, the southern zone of the Ciénaga de La Virgen is highly vulnerable due to precarious construction conditions, the absence of land use regulations, limited access to basic services, and poor road infrastructure. In addition, a significant number of highly vulnerable properties are concentrated in Punta Arena, on the island of Tierra Bomba. In terms of Cartagena's SLR capacities, the city shows a relatively high level, especially in the area of open government and environmental transparency, with 88.76 out of 100 points. However, the weakest aspect is land use planning, where the city scores 53.74 points.

Figure 4. Map of physical vulnerability to SLR in Cartagena de Indias.



In relation to the impact of sea level rise (SLR) on the different economic destinations, Table VI indicates that residential properties will be the most affected in Cartagena, they also represent the largest number of properties in very high vulnerability (61 properties), in addition to constituting a significant proportion of the areas of low and

moderate vulnerability on the coastline. Undeveloped urban lots represent the second most affected economic destination, concentrating the largest number of properties with a high degree of vulnerability. Commercial activity occupies third place in terms of impact, with the majority of properties classified at low to moderate vulnerability levels.

Table VI. Vulnerable buildings according to their economic destination ⁴ – Cartagena de Indias.

Economic Purpose	Vulnerability					General total
	Low	Moderately Low	Moderate	High	Very High	
Residential	1137	1053	1903	889	61	5043
Industrial	43	6	1			50
Commercial	583	314	45		6	948
Agricultural	3	13	27	9		52
Cultural	1		2			3
Recreational	3	3		2	1	9
Health	1	5				6
Institutional	26	16	6		2	50
Educational	37	26	9	1	1	74
Religious	245	328	113	82	23	791
Livestock	1					1
Forestry		2	1			3
Public Use	21	7	2	3	5	38
Special Services:	1		1			2
Developable Lot Not Urbanized	66	22	108	1188	10	1394
Urbanized Lot Not Built	7	3	8	8		26
Non-Developable Lot	1	2	1		1	5
General Total	2176	1800	2227	2182	110	8495

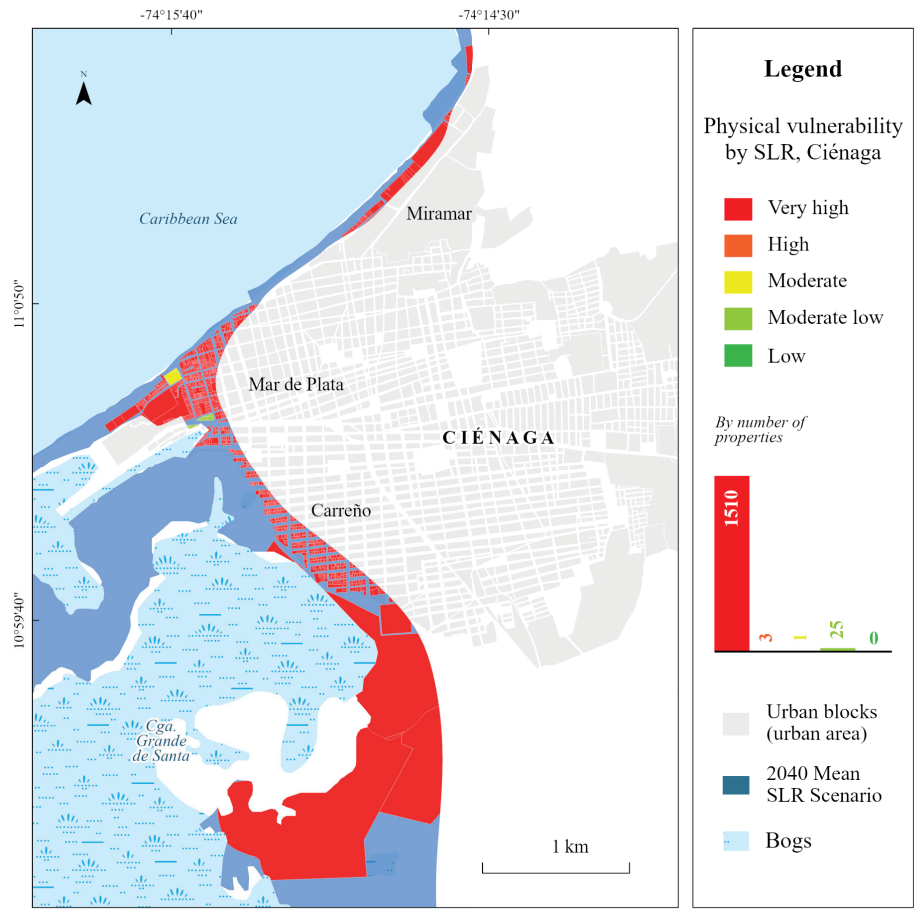
5.2.2. Ciénaga

Figure 5 shows a marked predominance of areas with very high physical vulnerability. This territory is characterized by buildings with low structural quality, which translates into limited resistance to environmental and climatic factors, such as flooding. In addition, these areas face insufficient coverage of basic public services, particularly

⁴ The economic destination is the classification for statistical purposes given to each property as a whole -land, constructions or buildings-, at the time of property identification in accordance with the predominant activity carried out therein (IGAC, 2021).

sanitation, together with an absence of urban planning and a deteriorated and poorly functional road infrastructure. These conditions are aggravated by a low adaptive capacity (35.06). This score reflects significant limitations in key areas: the mobilization of own resources (16.27) reflects low fiscal autonomy, restricting investment in adaptation; in open government and transparency (10.84), deficiencies in management and participation affect response capacity; and in territorial planning (38.63), the limited use of planning tools hinders risk mitigation.

Figure 5. Map of physical vulnerability to SLR in Ciénaga.



La Table VII reveals that the use most affected by SLR vulnerability is residential, with 1,446 properties classified in the highest impact category. In second place are undeveloped urbanized lots, with 29 properties showing high vulnerability. This distribution reflects a low economic diversity in the area, since vulnerable plots

associated with other uses, such as commercial, recreational or industrial, represent a significantly lower proportion.

Table VII. Vulnerable buildings by economic destination - Ciénaga.

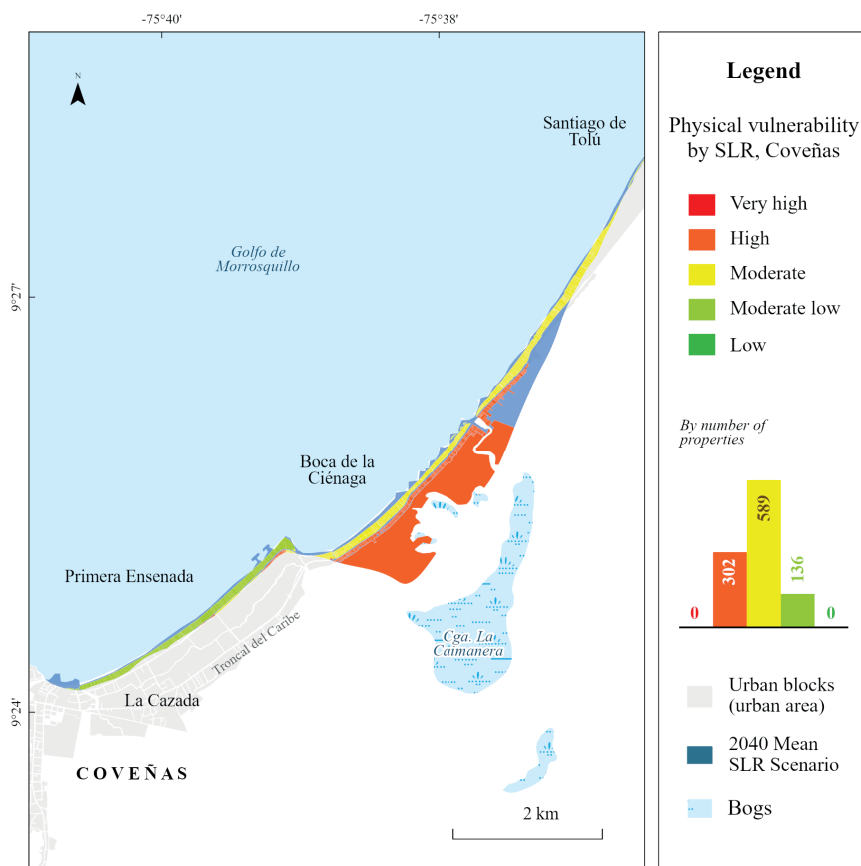
Economic Purpose	Vulnerability					General total
	Low	Moderately Low	Moderate	High	Very High	
Residential		22	1	2	1446	1471
Commercial		3			9	12
Agricultural					13	13
Recreational					9	9
Health					1	1
Educational					2	2
Developable Lot Not Urbanized					17	17
Urbanized Lot Not Built				1	29	30
General Total		25	1	3	1526	1555

5.2.3. Coveñas

In Coveñas, of a total of 1,027 vulnerable properties, 589 have a moderate degree of vulnerability, 302 have a high degree of vulnerability, and 136 have a low moderate degree of vulnerability. The greatest vulnerability is identified in the peripheral areas, where public service coverage is incomplete and the road infrastructure is characterized by unpaved or narrow roads of less than 4 meters. Houses in these areas are usually built with basic materials such as wood, brick or prefabricated, with zinc or tile roofs, and their finishes are simple. Unexpectedly, the properties adjacent to the coastal strip exhibit less vulnerability compared to those located further inland, attributable to the boost in tourism development, which has favored better infrastructure and service conditions, thus strengthening their capacity to adapt to SLR.

In the central core of the municipality, vulnerability is moderately low, associated with a more robust infrastructure, better established basic and complementary services, and greater economic diversity due to the presence of mixed uses.

Figure 6. Map of physical vulnerability to SLR in Coveñas.



According to economic activity, Table VIII shows residential use as the most impacted, with 456 properties classified in a moderate degree of vulnerability and 265 in a high degree, evidencing the risks faced by households in Coveñas. Recreational activity, with 107 properties in moderate vulnerability and 21 in high vulnerability, reflects the exposure associated with tourism development in coastal areas. For its part, the institutional activity registers 21 properties in high vulnerability, highlighting the threat to critical infrastructure.

Table VIII. Vulnerable buildings according to their economic destination - Coveñas.

Economic Purpose	Vulnerability					General total
	Low	Moderately Low	Moderate	High	Very High	
Residential		103	456	265		824
Commercial		1	2	1		4

Economic Purpose	Vulnerability					General total
	Low	Moderately Low	Moderate	High	Very High	
Agricultural				1		1
Recreational		4	107	21		132
Institutional			2	21		23
Forestry			1			1
Public Use		1				1
Urbanized Lot Not Built			8	1		9
No Information		27	16	1		44
General Total		136	592	311		1039

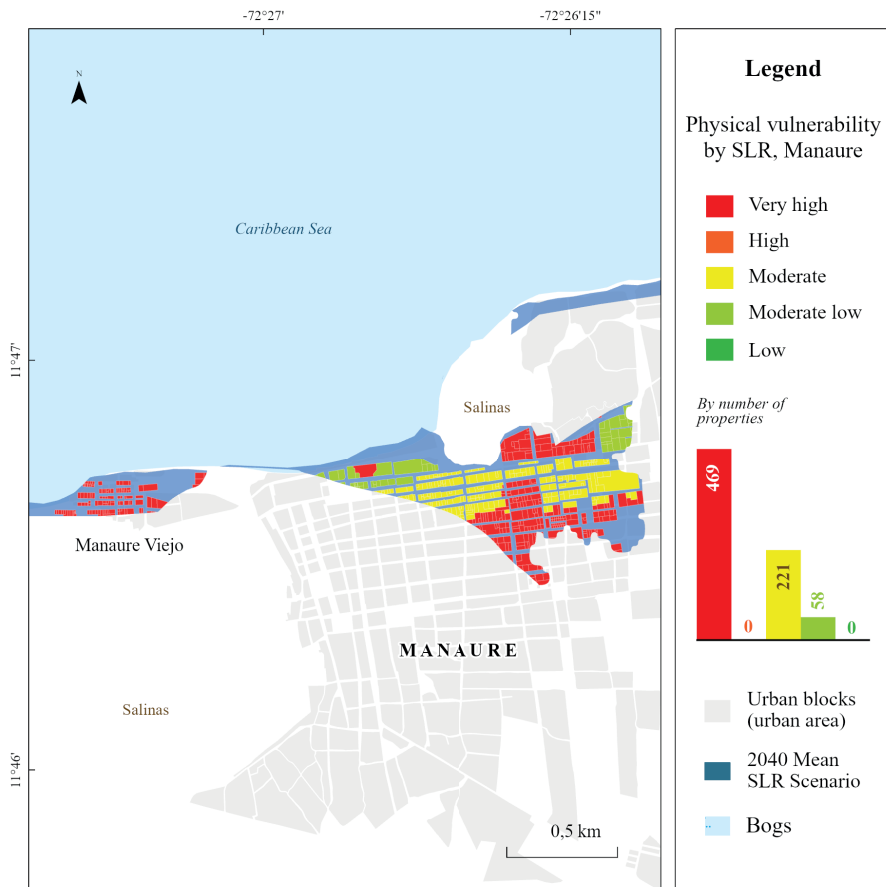
5.2.4. Manaure

Vulnerability in this municipality reflects that 469 properties present a very high vulnerability, mostly concentrated in the periphery of the municipal core. These properties are characterized by their unplanned construction, the use of precarious materials, their location in marginal areas with incomplete basic services and unpaved roads. On the other hand, 221 properties show moderate vulnerability, corresponding to brick or block buildings with simple finishes, which have basic and complementary services, as well as paved roads. In the central core, there are more consolidated areas, with better infrastructure conditions, basic and complementary services, paved roads, and buildings with facades classified as regular, built with brick or block walls and concrete slab or asbestos cement tile roofs. These properties have a low moderate vulnerability, with a total of 58 cases.

In terms of adaptive capacity, the municipality's performance can be considered moderate, standing out in aspects such as transparency (66.67) and resource execution (62.31). However, its main weakness lies in the mobilization of resources, both tax and non-tax, with a significantly low value of 2.65.

Minor inconsistencies were identified in the assignment of scores in the eastern peripheral zone of the municipality, where some cases classified as moderate-low and moderate-moderate vulnerability should correspond to high or very high. In a future phase, it is intended to improve the calculation method to automatically detect and correct these discrepancies, ensuring that the information can be used as a reliable and accurate planning. tool.

Figure 7. Map of physical vulnerability to SLR in Manaure.



La Table IX reveals that residential properties show the highest concentration of vulnerability, with 479 properties in high vulnerability, 150 in moderate and 32 in moderate low, suggesting deficiencies in construction quality and urban infrastructure. Undeveloped developable lots also show significant vulnerability, with 78 properties in very high and 66 in moderate, reflecting the absence of urbanization evidenced by the lack of access to basic services such as potable water, sewerage and paving. On the other hand, industrial, commercial, recreational, educational, religious and public uses present low vulnerability, with few cases in each grade, indicating less exposure to risks.

Table IX. Vulnerable buildings according to their economic destination - Coveñas.

Economic Purpose	Vulnerability					General total
	Low	Moderately Low	Moderate	High	Very High	
Residential		32	150		479	661
Industrial		1				1
Commercial		2	2		1	5
Agricultural			1			1
Recreational			1			1
Health		5	1			6
Educational		1			1	2
Religious		1				1
Public Use					1	1
Developable Lot Not Urbanized		16	66		78	160
Urbanized Lot Not Built					1	1
No Information					7	7
General Total		58	221		568	847

6. DISCUSSION

In Colombia, several studies have addressed vulnerability to SLR. Gallego and Selvaraj (2019) analyzed the vulnerability of the coastline in Buenaventura, considering factors such as sea level rise, coastal morphology, and land use. Hernández-Narváez et al. (2019) examined the impacts of sea level rise and coastal erosion in the coastal region, focusing on food security, human habitat, and infrastructure, under the IPCC framework. Restrepo-Ángel et al. (2021) highlighted that geological subsidence in Cartagena intensifies the effects of sea level rise. This research contributes significantly to the field by conducting a prospective assessment of the physical vulnerability of real estate and urban structures to SLR.

Regarding the results, it was estimated that in Cartagena 78,844 people and 17,430 urban buildings are exposed to SLR, figures that differ from those reported by Invemar et al. (2014), which identify 117,624 vulnerable people. This variation may be due to the fact that the Invemar study includes, in addition to SLR, flooding due to heavy rainfall, which expands the areas analyzed. While Invemar highlights neighborhoods such as Olaya Herrera, Nuevo Paraíso, El Pozón, Bocagrande and República del Líbano, this study highlights Manga, La Boquilla, Bocagrande, Centro and Getsemaní (see Table VI). These differences could be explained by the use of different SLR projections, since Invemar

considers an increase of between 15 and 20 centimeters for 2040 and includes the effect of heavy rains in its analysis.

In the framework of the TCNCC, IDEAM et al. (2017b) developed the Vulnerability and Risk Analysis for Climate Change in Colombia, with a comprehensive and multisectoral approach. Although the TCNCC provides a broad view of vulnerability to climate risks, the results of this research evidence greater vulnerability in the municipalities studied, underscoring the need for detailed analyses at local scales to better understand the specific dynamics of adaptation to SLR. It is important to recognize that, although social, economic and administrative transformations between studies may generate uncertainty in the projections, these analyses remain fundamental for administrations and communities to make informed decisions and react in a timely manner to possible emergencies.

The analysis reveals how vulnerability associated with SLR is strongly conditioned by structural inequalities in the municipalities studied. In Cartagena, a clear duality is observed: while consolidated areas such as Bocagrande and the historic center have infrastructure that largely mitigates their vulnerability, sectors such as the Ciénaga de La Virgen are critically exposed due to lack of regulation, precarious construction and limited basic services. This contrast shows that urban consolidation does not necessarily promote equity, but can perpetuate exclusion dynamics, particularly in the peripheries, where social and physical vulnerability is higher.

In municipalities such as Ciénaga, Coveñas and Manaure, the results differ due to their contexts. Ciénaga faces a high risk derived from its precarious construction and the scarce institutional capacity to manage land use, which aggravates exposure in peripheral areas. In Coveñas, although some sectors are physically more exposed, tourist activity and economic investment have strengthened the adaptive capacity of certain properties, showing that vulnerability does not depend exclusively on physical factors. For its part, Manaure, with its territorial marginality, reflects the need to articulate institutional and community efforts to overcome exclusion and promote contextually appropriate solutions. These cases underscore that solutions must transcend physical infrastructure, also considering the economic and social dynamics that perpetuate exclusion and risk.

In terms of vulnerability and commercial activities to SLR, residential uses are the most vulnerable in all cities, highlighting the direct impact on households and the need to ensure safe habitability in a context of climate change. These uses present a greater predisposition to a high degree of vulnerability. On the other hand, although commercial, recreational and institutional activities are less representative in numerical terms, they present significant risks due to their concentration in areas with greater direct exposure.

However, their lower vulnerability compared to residential uses can be attributed to economic and infrastructure factors, which give them a greater capacity to adapt to the impacts of SLR and other oceanic phenomena.

We also assessed the potential economic losses to the city's real estate assets, as well as the impact of sea level rise on the various economic activities of the municipalities. This integrated approach allows us not only to understand the direct implications of SLR, but also to provide a solid basis for local authorities to make informed decisions. This information is essential for local administrations to anticipate, prioritize strategic sectors and act effectively in mitigating and adapting to SLR risks.

These results underscore the urgency of implementing differentiated actions to mitigate vulnerability to SLR. While consolidated coastal areas require mitigation and adaptation strategies to protect their critical and economic infrastructure, marginal areas require urgent structural and social interventions to improve living conditions, regularize settlements and guarantee equitable access to basic services, preventing exclusion and precariousness from continuing to grow.

The multipurpose cadastre is a key input for analyzing territorial vulnerability to climate change, as it offers a unique geographical detail at the property level. Its information on physical characteristics, land use and infrastructure, together with its constant updating and public access, allows for the assessment of vulnerability conditions and informed decision making. This study shows that the impact of SLR varies among properties, highlighting the need for more precise analyses, which are still limited in the country. Thus, the multipurpose cadastre complements and amplifies the effectiveness of other approaches, providing a more accurate and nuanced view of territorial risks and inequalities.

Although this research provides a detailed view of municipal vulnerability to SLR, it is necessary to recognize certain aspects that may influence its scope and interpretation. Cadastral data were key to assessing economic losses and territorial vulnerability, but the comparison between properties showed some discrepancies in the scores assigned to the physical homogeneous zones. Although these inconsistencies did not significantly affect the results, they do highlight the need to optimize data collection and validation procedures. Implementing additional methodologies to correct for variations could improve the accuracy of the analyses.

On the other hand, the analysis of municipal capacity considered both tax and non-tax revenues; however, municipalities with greater economic dynamism, such as those with a high presence of commerce, industry or tourism, have higher collection levels. In municipalities with a high proportion of informal housing, additional challenges

are evident, since this condition not only limits resources, but also increases the attention to the vulnerable population. Therefore, future studies could include informality as a key variable to analyze its impact on the local response capacity to SLR.

Finally, this research opted to assign equal weights to the variables, allowing for a balanced and transparent analysis. However, future studies could explore methodologies such as assigning differentiated weights through expert criteria or multi-criteria approaches, to further adjust the analyses to the dynamics of each municipality. These strategies would provide additional perspectives without underestimating the usefulness and robustness of the implemented approach.

Spatial inequalities in the distribution of infrastructure, basic services and land-use regulation are evidence of a structural imbalance in the development of the municipalities studied. In the central urban centers, comprehensive planning favors the concentration of critical infrastructure, such as transportation networks and service systems, which improves the quality of life and fosters economic development. However, in peripheral areas, lack of planning and insufficient road infrastructure and essential services generate marginalization, increasing territorial disconnection and the vulnerability of the inhabitants. This analysis shows spatial segregation, a product of the historical disconnection of these areas from urban planning processes, perpetuating their vulnerability and exclusion within the territory.

Sea level rise requires a research approach that considers both its immediate effects and long-term transformations in coastal cities. It is essential to delve deeper into the dynamics of climate migrations and their impact on the receiving territories, analyzing how they redistribute risks, widen inequalities and limit access to essential resources. Likewise, identifying areas of potential displacement and designing inclusive and resilient urban strategies will make it possible to anticipate future scenarios. This field must move towards interdisciplinary approaches that integrate the social, economic and environmental dimensions, promoting solutions that reduce structural vulnerabilities and guide planning towards effective responses to emerging climate challenges.

7. CONCLUSION

The analysis reveals that vulnerability to sea level rise (SLR) is not only a matter of geographic exposure, but also of deep structural inequalities in the urban areas studied. Poor infrastructure conditions, lack of planning and low adaptive capacity are concentrated in the most vulnerable sectors, indicating that the impacts of climate change are not evenly distributed. These findings suggest that, in addition to the traditional mitigation approach,

it is essential to implement strategies that address structural inequalities and strengthen local adaptive capacities, setting a precedent for public policies that integrate sustainable and contextualized solutions to SLR in Colombia.

Real estate assets directly exposed to sea level rise must be considered along with adjacent areas, as these will also be subject to the collateral effects of phenomena such as coastal erosion, beach retreat, flooding, and increased frequency and intensity of storms and high tides. These surrounding areas, although not directly under the immediate threat of SLR, will experience significant impacts due to coastal dynamics and the interaction of these phenomena, which increases the vulnerability of communities. This set of risks increases the complexity of vulnerability scenarios, underscoring the urgency of anticipating future impacts and adopting preventive measures that protect communities as a whole.

Projected sea level rise by 2040 threatens to aggravate territorial inequalities, especially in the most vulnerable areas. The lack of adaptive capacity and the fragility of these areas require urgent action. It is necessary to implement urban policies that integrate climate risk management, prioritizing prevention and infrastructure improvement in critical areas. Only through differentiated interventions that address both infrastructure protection and equitable access to services will it be possible to mitigate vulnerability to SLR, promoting spatial justice and reducing social and territorial exclusion.

The multipurpose cadastre emerges as a key tool for understanding the distribution of risk and accounting for exposed assets, making it possible to assess the impacts of phenomena such as sea level rise at a precise scale, such as the property unit. This tool can guide informed decision making, promoting resilient and equitable urban development. In this context, SLR is not only an environmental challenge, but also a challenge for spatial and social justice, as well as for long-term sustainable urban planning.

Sea level rise triggers massive relocation processes to less exposed areas, intensifying the demand for space in already overburdened areas. This phenomenon can lead to gentrification, displacing the most vulnerable residents and deepening urban segregation, relegating the affected populations to peripheries marked by precarious conditions in terms of services, infrastructure and quality of life. These processes exacerbate social inequalities and generate territorial, economic and social tensions that jeopardize urban cohesion and the resilience of cities. Faced with these challenges, it is urgent to implement inclusive and resilient urban planning strategies that integrate vulnerable communities in climate change adaptation processes.

8. AUTHORS' CONTRIBUTIONS

LSB: conceptualization, methodology, formal analysis, writing (original draft).

GERG: conceptualization, writing, cartographic design.

IDCP: methodology, writing (review and editing).

JAAA: project administration, methodology.

All authors have read and approved the published version of the manuscript.

REFERENCES

Alcaldía Municipal de Manauere. (2016). Plan Territorial de Salud (2016-2019) [Informe]. Recuperado de <http://www.manauere-laguajira.gov.co>

Belmonte, A. M., López-García, M. J., & Soriano-García, J. (2011). Mapping temporally variable exposure to flooding in small Mediterranean basins using land-use indicators. *Applied Geography*, 31(1), 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.03.003>

Caracol Radio (09 de enero de 2020). Erosión costera amenaza con desaparecer zona urbana en Ciénaga, Magdalena. https://caracol.com.co/emisora/2020/01/09/santa_marta/1578570420_421363.html

Cartagena Cómo Vamos. (2023). *Informe de Calidad de Vida Cartagena 2023*. Recuperado de <https://www.cartagenacomovamos.org>

COSALFA. (s.f.). *Sobre Cartagena de Indias - Colombia*. PANAFTOSA. Recuperado el 3 de diciembre de 2024, de: https://www.panaftosa.org/cosalfa46/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=71&lang=es

DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Recuperado de <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/>

Departamento Nacional de Planeación - DNP (2021). *Medición de Desempeño Municipal: Informe de resultados MDM 2021*. DNP. Recuperado de: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Territorial/MDM/2021/Informe%20MDM%20-%202021.pdf>

Díaz-García, Ovel, Zavala-Hidalgo, Jorge, Douillet, Pascal, Ruiz-Esparza, Adolfo Contreras, Fichez, Renaud, Grenz, Christian, & Denis, Lionel. (2020). Changes in the flooding area due to storm surge under climate change in an extensive wetland area in the southern Gulf of Mexico. *Atmósfera*, 33(2), 105-121. Epub 11 de diciembre de 2020. <https://doi.org/10.20937/atm.52702>

Echeverry, J. & Marriaga, L. (2018). Aproximación metodológica para el cálculo de índices de sensibilidad costera ante erosión. Caso de aplicación: departamento de Bolívar, Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 36, 17-39. <https://doi.org/10.26640/22159045.436>

El Colombiano (10 de noviembre de 2011). El mar estrecha su cerco sobre Coveñas. https://www.elcolombiano.com/historico/el_mar_estrecha_su_cerco_sobre_covenas-EYEC_157751

El Informador (06 de septiembre de 2024). Pescadores de la Ciénaga Grande sufren consecuencias por cambio climático. <https://www.elinformador.com.co/index.php/el-magdalena/83-departamento/321155-pescadores-de-la-cienaga-grande-sufren-consecuencias-por-cambio-climatico>

Gallego, B. E., & Selvaraj, J. J. (2019). Evaluation of coastal vulnerability for the District of Buenaventura, Colombia: A geospatial approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 16, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100263>

García Echavarría, L. M., Alcántara-Carrió, J., & Jaramillo Vélez, A. (2022). Vulnerabilidad costera ante el ascenso del nivel del mar en el suroccidente del Caribe colombiano: Coastal vulnerability to sea level rise in the southwestern Colombian Caribbean. *Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras*, 51(2), 9–28. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2022.51.2.1124>

Gobernación de Sucre, Estrategia de Productividad e Innovación (EPI), & Fondo Mixto para la Promoción de la Cultura y las Artes. (2023). Sistema de información y Mapa Cultural de Sucre. Recuperado de <https://fondomixtodesucre.org>

Guardela Contreras, L. (2023). Fomento administrativo y fortalecimiento institucional en la gestión integral de cambio climático: Reflexiones desde el Caribe colombiano. En L. Muñoz Ávila (Ed.), *Cambio climático y desarrollo sostenible en Colombia* (pp. 315-330). Editorial Universidad del Rosario. <https://doi.org/10.12804/urosario9789585001978>

Hamburguer Cardenas, O., & Ramirez Molina, J. (2023). Análisis de vulnerabilidad y medidas de adaptación de cambio climático para el puerto de Compas Cartagena [Tesis de maestría, Universidad EAN]. Repositorio Institucional Universidad EAN. <https://repository.universidadean.edu.co/items/e55bdf58-fb64-43de-9149-44637dcc4d21>

Hernández-Narváez, D., Vega-Cabrera, A., Zamora-Bornachera, A., & Sierra-Correa, P. C. (2019). El cambio climático y los impactos socioeconómicos sobre la zona costera e insular colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 48(2), 9-32. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2019.48.2.764>

Herrera Carmona, J. C., Prüssmann Uribe, J., Abud Hoyos, M., & Zapata Padilla, L. A. (2024). Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático del socioecosistema de manglar en Colombia. *Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras*, 53(2), 103–132. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2019.48.2.764>

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2017). Tercera comunicación nacional de cambio climático: República de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2017b). Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.

IDEAM. (2018). Variabilidad climática y cambio climático en Colombia. Bogotá: IDEAM. Disponible en <http://www.andi.com.co/Uploads/variabilidad.pdf>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2021). *Elaboración del estudio de zonas homogéneas físicas y geoeconómicas y determinación del valor unitario e integral (PH) por tipo de construcción*. IGAC. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-fac-pc03-01_zfhyg_0.pdf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2024). Elaboración, revisión, modificación y ajustes de los estudios de zonas homogéneas físicas y geoeconómicas (PC-GCT-03) (Versión 1, vigente desde 01/04/2024). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/PC-GCT-03%20ZHFG_0.pdf

Invemar, MADS, Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias y CDKN. 2014. Integración de la adaptación al cambio climático en la planificación territorial y gestión sectorial de Cartagena de Indias. Informe

técnico final. Editores: Rojas G., X., M. Ulloque R. y M. Lacoste. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 62, Santa Marta.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379>

IPCC. (2019). Annex I: Glossary (N. M. Weyer, Ed.). En H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer (Eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 677–702). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.010>

Jaramillo Rodríguez, O. R., Mejía Ayala, W., & Lamprea Quiroga, P. S. (2024). Impactos del ascenso del nivel del mar sobre los hospedajes con destinación turística en el municipio de Santa Marta, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 29(2), 1–21. <https://doi.org/10.19053/uptc.01233769.15366>

Kelly, P.M. and W.N. Adger, 2000: Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climatic Change*, 47, 325–352.

O'Brien, K., S. Eriksen, L.P. Nygaard, and A. Schjolden, 2007: Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Climate Policy*, 7, 7–88.

Orejarena-Rondón, A. F., Sayol, J. M., Marcos, M., Otero, L., Restrepo, J. C., Hernández-Carrasco, I., & Orfila, A. (2019). Coastal impacts driven by sea-level rise in Cartagena de Indias. *Frontiers in Marine Science*, 6(614). <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00614>

Martínez Arroyo, A., Manzanilla Naim, S., & Zavala Hidalgo, J. (2011). Vulnerability to climate change of marine and coastal fisheries in México. *Atmósfera*, 24(1), 103–123.

Mejía, E. (08 de febrero de 2024). En video: Mar de Leva, lluvias y fuertes vientos tienen en alerta a La Guajira. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/mar-de-leva-y-fuertes-vientos-alerta-en-la-guajira-852858>

Michellier, C., Kervyn, M., Barette, F., Syavulisembo, A., Kimanuka, C., Mataboro, S., Hage, F., Wolff, É., & Kervyn, F. (2020). Evaluating population vulnerability to volcanic risk in a data scarcity context: The case of Goma city, Virunga volcanic province (DR Congo). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 45, 101460. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101460>

Monsalves Gavilán, P., Pincheira-Ulbrich, J., & Rojo, F. (2013). Climate change and its effects on urban spaces in Chile: A summary of research carried out in the period 2000–2012. *Atmósfera*, 26(4), 465–478. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/37041>

Petrone-Mendoza, V., García-Meneses, P. M., Maass, M., Castillo-Álvarez, A., & Zorrilla-Ramos, M. (2024). Vulnerability to climate change: An analysis of its conceptualization in Mexico. *Other Life Sciences*. <https://doi.org/10.31223/X5342G>

Rangel-Buitrago, N. G., & Posada-Posada, B. O. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio en la línea de costa. *Intropica*, 8(1), 29–42. Recuperado a partir de <https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/730>

REACH Initiative. (2023). *Evaluación basada en área en Ciénaga, Magdalena - Septiembre 2023*. ReliefWeb. Recuperado de <https://reliefweb.int/report/colombia/evaluacion-basada-en-area-en-cienaga-magdalena-septiembre-2023-colombia>

Restrepo-Ángel, J. D., Mora-Páez, H., Díaz, F., Govorcín, M., Wdowski, S., Giraldo-Londoño, L., Tosic, M., Fernández, I., Paniagua-Arroyave, J. F., & Duque-Trujillo, J. F. (2021). Coastal subsidence increases vulnerability to sea level rise over the twenty first century in Cartagena, Caribbean Colombia. *Scientific Reports*, 11(1), 18189. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97555-0>

Semana (2010). El mar sitia a Cartagena. <https://www.semana.com/el-mar-sitia-cartagena/120239-3/>

Sinha, E., Michalak, A. M., & Balaji, V. (2023). Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystem – A review. *Environmental Research*, 229, 117233. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117233>

Torrado, A. (13 de julio de 2018). Mar de leva inundo calles de algunos barrios de Ciénaga y Tasajera. *Código Prensa*. <https://codigoprensa.com/mar-leva-inundo-calles-barrios-cienaga-tasajera/>

Van der Molen, P. (2009). *Cadastres and climate change*. En Proceedings of the FIG. Federación Internacional de Agrimensores (FIG). https://www.fig.net/resources/monthly_articles/2009/vandermolen_august_2009.asp

Vivas, J. (20 de agosto de 2019). El mar está a punto de llevarse las tumbas de un cementerio guajiro. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/mar-esta-a-punto-de-destruir-cementerio-en-el-pajaro-la-guajira-401784>

W Radio (2023). Erosión costera amenaza las playas de Coveñas: hablan la comunidad y las autoridades. <https://www.wradio.com.co/2023/03/28/erosion-costera-amenaza-las-playas-de-covenas-hablan-la-comunidad-y-las-autoridades/>

CAPÍTULO 2

CONFIGURACIÓN TERRITORIAL DE LA SOBERANÍA ALIMENTARIA: EXPLORANDO LAS TERRITORIALIDADES RURALES EN FONSECA, COLOMBIA

Data de submissão: 06/08/2026

Data de aceite: 21/08/2026

Mg. Elkis Peñaranda Pinto

Universidad de La Guajira

Riohacha, La Guajira, Colombia

<https://orcid.org/0000-0001-6197-4843>

RESUMEN: Este artículo analiza el impacto de las políticas de desarrollo rural en la configuración de las territorialidades rurales y la soberanía alimentaria en el municipio de Fonseca, localizado en la subcuenca media del río Ranchería (La Guajira, Colombia). El estudio parte de la premisa de que la expansión de modelos agroindustriales, especialmente el monocultivo de palma de aceite ha transformado las relaciones entre la población rural, la tierra y el agua, generando disputas territoriales que inciden en la producción de alimentos. Metodológicamente, se desarrolló un estudio de caso con enfoque cuali-cuantitativo que integró revisión documental de políticas públicas, análisis de estadísticas agropecuarias y de concentración de la propiedad rural, entrevistas semiestructuradas a campesinos, un líder indígena y un productor agrícola, así como un taller participativo con cartografía social realizado en el corregimiento de Conejo. Los resultados evidencian que las políticas de desarrollo rural orientadas a la modernización

agrícola favorecieron la expansión de cultivos agroindustriales, la concentración de la tierra y el acceso desigual al agua, reduciendo la diversidad productiva y debilitando la soberanía alimentaria local. Asimismo, se identifican territorialidades rurales diferenciadas que expresan proyectos de desarrollo en disputa entre actores que promueven el agronegocio y comunidades que defienden la agricultura familiar y el policultivo. Como principal aporte teórico, se propone el concepto de escalas territoriales de la soberanía alimentaria, integrado por los niveles de insoberanía, des-soberanía y prosoberanía alimentaria territorial, los cuales permiten interpretar las distintas formas de pérdida, disputa y recuperación del control comunitario sobre los sistemas alimentarios. Se concluye que la soberanía alimentaria constituye un proceso territorial dinámico, condicionado por relaciones de poder y por las estrategias de resistencia desarrolladas por las comunidades rurales frente a la expansión del extractivismo agrícola.

PALABRAS CLAVE: desarrollo rural; soberanía alimentaria; territorialidades rurales; palma de aceite; agronegocio.

TERRITORIAL CONFIGURATION OF FOOD SOVEREIGNTY: EXPLORING RURAL TERRITORIALITIES IN FONSECA, COLOMBIA

ABSTRACT: This article analyzes the impact of rural development policies on the configuration

of rural territorialities and food sovereignty in the municipality of Fonseca, located in the middle Ranchería River sub-basin, La Guajira, Colombia. The study is based on the premise that the expansion of agro-industrial production models, particularly oil palm monoculture, has transformed the relationships between rural communities, land, and water, generating territorial disputes that directly affect food production. A qualitative-quantitative case study approach was adopted, integrating documentary analysis of public policies, agricultural production statistics, and rural land concentration data, together with semi-structured interviews conducted with peasants, an Indigenous leader, and an agricultural producer, as well as a participatory workshop using social mapping techniques. The findings show that rural development policies aimed at agricultural modernization have encouraged the expansion of agro-industrial crops, increased land concentration, and reinforced unequal access to water resources, thereby reducing agricultural diversity and weakening local food sovereignty. The study also identifies differentiated rural territorialities that reflect competing development projects between actors promoting agribusiness and rural communities defending family farming and diversified cropping systems. As its main theoretical contribution, the article proposes the concept of territorial scales of food sovereignty, comprising three interrelated levels: territorial food insovereignty, territorial food dis-sovereignty, and territorial pro-sovereignty. These categories provide an analytical framework for understanding the different forms through which communities lose, dispute, or recover control over their food systems. The study concludes that food sovereignty is a dynamic territorial process shaped by power relations and by the resistance strategies developed by rural communities in response to the expansion of agricultural extractivism.

KEYWORDS: rural development; food sovereignty; rural territorialities; oil palm; agribusiness.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la apertura económica implementada en Colombia durante la década de 1990, las políticas de desarrollo rural han promovido la modernización agrícola, la competitividad y la inserción de la producción nacional en los mercados internacionales. Este proceso favoreció la expansión de cultivos agroindustriales, especialmente la palma de aceite, pero también transformó las dinámicas productivas rurales, generando efectos sobre la producción de alimentos, la distribución de la tierra y la soberanía alimentaria. De acuerdo con la Evaluación Agropecuaria (EVA, 2022), mientras entre 2015 y 2018 aumentó la producción de oleaginosas, cultivos alimentarios como el maíz y el arroz registraron reducciones, tendencia que también se reflejó en departamentos como La Guajira.

Estas transformaciones han estado acompañadas por una creciente concentración de la propiedad rural. Según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA, 2018), La Guajira presenta algunos de los índices de Gini de la tierra más elevados del país, situación asociada a procesos históricos de desigualdad en el acceso a la tierra, expansión del latifundio, conflictos por la propiedad y políticas que favorecieron la consolidación de grandes unidades productivas (Martínez, 2021). Esta realidad ha

limitado las posibilidades de reproducción de la agricultura campesina y ha incrementado la vulnerabilidad de las comunidades rurales.

Uno de los territorios donde estas dinámicas resultan más evidentes es la subcuenca media del río Ranchería, integrada por los municipios de Barrancas, Distracción, Fonseca, Hatonuevo y San Juan del Cesar. Allí, la concentración de la propiedad rural alcanza valores de Gini entre 0,67 y 0,71, reflejando altos niveles de desigualdad en la distribución de la tierra (Tabla 1).

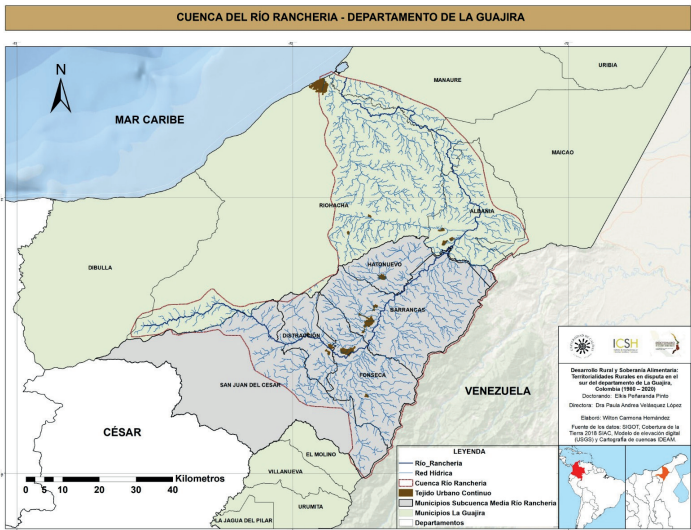
Tabla 1. Índice de Gini de la tierra rural en los municipios que conforman la subcuenca media del río Ranchería.

Municipio	Área	Propietarios	Gini	Clasificación Gini
Barrancas	59.927	1.110	0.6829	Alto Gini
Distracción	20.041	667	0.7116	Alto Gini
Fonseca	34.354	1.149	0.6711	Alto Gini
Hatonuevo	9.935	244	0.7100	Alto Gini
San Juan Del Cesar	96.377	2.384	0.6760	Alto Gini
Total	302.086	7.273		

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, (UPRA, 2018).

La subcuenca media constituye un espacio estratégico para el desarrollo rural del departamento debido a la disponibilidad de agua proveniente del río Ranchería y a las condiciones agroecológicas que favorecen tanto la agricultura tradicional como los cultivos comerciales. En ella convergen campesinos, pueblos indígenas, pequeños y medianos productores y otros actores cuyas relaciones políticas, económicas, sociales y ambientales configuran distintas formas de apropiación y uso del territorio (Figura 1).

Figura 1. Cuenca del río Ranchería.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2023).

Dentro de este territorio, el municipio de Fonseca sobresale por su importancia histórica como principal zona productora de alimentos de La Guajira (Federación Canadiense de Municipalidades [FCM], 2017). Sus condiciones ambientales, la disponibilidad de agua y la diversidad de actores rurales han favorecido una agricultura basada tradicionalmente en policultivos destinados al abastecimiento regional. Sin embargo, durante la última década el municipio también se ha convertido en un escenario atractivo para la expansión de la palma de aceite y otros cultivos agroindustriales, modificando la estructura productiva local.

Las estadísticas agrícolas evidencian esta transformación. Entre 2008 y 2018 aumentó significativamente la producción de oleaginosas en la subcuenca media, mientras varios grupos de cultivos agroalimentarios redujeron su participación relativa (Tabla 2). Estas tendencias reflejan la transición hacia modelos productivos orientados al mercado y plantean interrogantes sobre sus efectos en la soberanía alimentaria y en las relaciones territoriales de la población rural.

Tabla 2. Producción agrícola de los municipios de la subcuenca media del río Ranchería.

Municipios	Cultivos agroalimentarios								Cultivos agroindustriales							
	Frutales		Hortalizas		Cereales		Leguminosas		Tubérculos y plátanos		Oleaginosas		Fibras		Otros permanentes	
	2008	2018	2008	2018	2008	2018	2008	2018	2008	2018	2008	2018	2008	2018	2008	2018
Barrancas	133	812	441	930	1.900	1.275	24	80	2.237	1.980	0	229	0	0	431	395
Distracción	90	264	278	248	3.755	2.093	70	29	1.116	2.197	0	320	0	13	23	1
Fonseca	475	870	640	390	5.642	4.095	24	28	3.259	4.804	0	911	154	435	142	256
Hatonuevo	112	106	333	165	948	250	79	18	525	964	0	0	0	0	63	74
San Juan Del Cesar	2.219	2.130	1.422	874	3.419	2.298	124	191	9.147	10.890	0	267	961	605	180	489
Total	3.029	4.182	3.114	2.607	15.664	10.011	321	346	16.284	20.835	0	1.727	1.115	1.053	839	1.215

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Evaluación Agropecuaria (EVA, 2022).

Si bien numerosos estudios han analizado el desarrollo rural desde perspectivas asociadas a la modernización agrícola, la pluriactividad o la diversificación económica (Kay, 2015; Concheiro y Grajales, 2009), son escasas las investigaciones que examinan de manera integrada cómo estas políticas reconfiguran las territorialidades rurales y transforman la soberanía alimentaria. En este trabajo se parte de la perspectiva de los estudios territoriales, entendiendo el territorio como una construcción social donde confluyen dimensiones políticas, económicas, ambientales y culturales. Desde esta mirada, las relaciones entre actores, recursos y prácticas productivas permiten comprender las disputas por el control de la tierra, el agua y los sistemas alimentarios.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

La relación entre la agricultura intensiva, la expansión de los cultivos agroindustriales y la reducción de la producción agrícola tradicional ha sido ampliamente estudiada en América Latina debido a sus implicaciones sobre la seguridad y la soberanía alimentaria. Diversas investigaciones evidencian que la expansión de monocultivos destinados al mercado internacional ha transformado las estructuras agrarias, disminuido la diversidad productiva y afectado las condiciones de vida de las poblaciones rurales. En Argentina, Aizen y Garibaldi (2009) documentan los efectos de la expansión de la soja transgénica sobre la agricultura familiar; en Brasil, Bickel y Dros (2003) analizan las transformaciones de la estructura agraria derivadas del crecimiento de la agricultura intensiva; mientras que Toledo (1981), para México, destaca la pérdida de diversidad biocultural y de soberanía alimentaria asociada al avance de los monocultivos. En Colombia, Fajardo (2014) e Ibáñez et al. (2013) muestran que las políticas orientadas al agronegocio han profundizado las desigualdades rurales, favoreciendo modelos productivos que privilegian la rentabilidad económica sobre la producción de alimentos.

Paralelamente, los enfoques de Desarrollo Territorial Rural (FIDA, 2002; Schejtman y Berdegú, 2003; Favareto, 2007) y de la nueva ruralidad (IICA, 2001; CEDRSSA, 2007; Pérez, 2016) proponen estrategias de diversificación económica, participación comunitaria y fortalecimiento territorial. Sin embargo, aunque estas perspectivas amplían la comprensión del espacio rural más allá de la agricultura, también pueden favorecer procesos de sustitución de actividades agroalimentarias por actividades no agrícolas o agroindustriales cuando las políticas públicas privilegian la inserción competitiva en los mercados sobre la producción de alimentos.

En consecuencia, numerosos territorios latinoamericanos han experimentado una reducción de la producción agrícola tradicional y un fortalecimiento de modelos extractivistas basados en monocultivos. Estos procesos han impulsado la concentración de la tierra, el desplazamiento de pequeños productores y la pérdida de diversidad agrícola. Oxfam (2016) identifica patrones similares en América Latina, África y Asia, donde la agricultura intensiva favorece la consolidación de grandes propiedades, incrementa la explotación laboral y profundiza las desigualdades en el acceso a la tierra y a los medios de producción.

3. EL CASO DE FONSECA, LA GUAJIRA

Fonseca constituye un escenario representativo para analizar estas dinámicas debido a sus ventajas naturales, productivas y estratégicas. Su localización entre la

Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá, la disponibilidad de suelos aptos para la agricultura y la influencia del Proyecto Ranchería, orientado a optimizar el uso del agua mediante obras de adecuación de tierras (INCODER, 2011), han consolidado al municipio como uno de los principales productores agrícolas de La Guajira. A ello se suma la presencia de una población rural diversa integrada por campesinos, indígenas y pequeños y medianos productores, reconocida por su aporte histórico al abastecimiento alimentario departamental (FCM, 2017). Asimismo, las mejores condiciones de seguridad derivadas del proceso de reincorporación de excombatientes favorecieron la llegada de inversiones agroindustriales, especialmente en palma de aceite.

Entre 2008 y 2018, la producción de oleaginosas pasó de cero a 991 toneladas, crecimiento asociado a un conjunto de políticas nacionales de promoción del agronegocio, entre ellas las Leyes 138 y 139 de 1994 y la Ley 1776 de 2016 (ZIDRES), que fortalecieron las alianzas productivas y estimularon la expansión de cultivos orientados al mercado. Paralelamente, aumentó la concentración de la propiedad rural como resultado de la venta de predios por parte de pequeños productores, motivada por la escasa rentabilidad del policultivo, la insuficiencia de apoyos estatales y los efectos acumulados de la violencia, circunstancias que facilitaron la expansión de medianos y grandes propietarios.

Estas transformaciones han configurado nuevas disputas territoriales en torno a la tierra, el agua y la producción agrícola. Para comprenderlas, este estudio adopta el concepto de territorialidad desde una perspectiva relacional. Tuan (1983) la entiende como una construcción social basada en la interpretación del espacio; Massey (1984) la concibe como una práctica espacial producida por las relaciones sociales; y Saquet (2015) la define como las diversas formas de apropiación, uso y organización del espacio en múltiples escalas. En conjunto, estas perspectivas permiten interpretar las territorialidades rurales como procesos dinámicos en los que convergen dimensiones materiales, simbólicas, políticas y culturales.

Desde este enfoque, las disputas por el territorio en Fonseca trascienden el acceso a la tierra o al agua para expresar relaciones de poder entre actores con proyectos productivos diferenciados. Mientras algunos impulsan la expansión de la agroindustria y los monocultivos, otros defienden sistemas agrícolas diversificados orientados al abastecimiento alimentario local. En consecuencia, las territorialidades rurales constituyen una categoría analítica fundamental para comprender cómo los modelos de desarrollo rural reconfiguran el espacio, modifican las formas de apropiación territorial y condicionan la soberanía alimentaria de las comunidades rurales.

4. METODOLOGÍA

Este artículo presenta resultados parciales de la investigación doctoral Desarrollo rural y soberanía alimentaria: Territorialidades rurales en disputa en el sur del departamento de La Guajira, Colombia (1980–2020), desarrollada en el Doctorado en Estudios Territoriales de la Universidad de Caldas. El estudio se orienta a comprender cómo las políticas de desarrollo rural han transformado las territorialidades y la soberanía alimentaria en el municipio de Fonseca, localizado en la subcuenca media del río Ranchería.

Se adoptó un enfoque metodológico cuali-cuantitativo, mediante un estudio de caso que integró información documental, estadística y empírica. La fase documental comprendió la revisión de planes nacionales de desarrollo, normas relacionadas con el desarrollo rural y la agroindustria, documentos oficiales e investigaciones académicas sobre políticas rurales, soberanía alimentaria y transformaciones territoriales en Colombia. De manera complementaria, se analizaron estadísticas de producción agrícola provenientes de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) y datos sobre concentración de la propiedad rural de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), con el propósito de identificar cambios en la estructura productiva del municipio entre 2008 y 2018.

El trabajo de campo se desarrolló en el municipio de Fonseca durante 2023. Se realizaron cuatro entrevistas semiestructuradas: dos a campesinos, una a un líder indígena del resguardo Mayabangloma y una a un productor agrícola vinculado a la agroindustria. Las entrevistas abordaron las percepciones de los participantes sobre las políticas de desarrollo rural, las transformaciones en el uso de la tierra y el agua, las dinámicas territoriales y sus implicaciones para la producción de alimentos.

Adicionalmente, se llevó a cabo un taller participativo en el corregimiento de Conejo con la participación de campesinos, representantes de organizaciones rurales e indígenas. El taller permitió identificar las principales problemáticas relacionadas con el acceso a la tierra, el agua y otros bienes naturales, así como reconstruir, mediante cartografía social, las transformaciones productivas y las disputas territoriales asociadas a la expansión de la agroindustria. De este ejercicio se obtuvo el mapa participativo utilizado para analizar la configuración territorial de la soberanía alimentaria.

La información recopilada fue organizada y analizada mediante un proceso de triangulación entre las fuentes documentales, los datos estadísticos y los testimonios obtenidos en el trabajo de campo. Este procedimiento permitió contrastar la evolución de la estructura productiva con las experiencias de los actores rurales e interpretar las transformaciones territoriales desde la perspectiva de los estudios territoriales,

identificando las relaciones entre políticas públicas, disputas por la tierra y el agua y las diferentes escalas de la soberanía alimentaria propuestas en esta investigación.

5. RESULTADOS

5.1. IMPACTO DE LAS POLÍTICAS DE DESARROLLO RURAL EN LA SOBERANÍA ALIMENTARIA

Las políticas de desarrollo rural implementadas en Colombia desde la década de 1990 han privilegiado la modernización agrícola, la competitividad y la inserción en los mercados internacionales, configurando un modelo orientado al fortalecimiento del agronegocio. Durante el gobierno de César Gaviria (1990-1994), la apertura económica promovió políticas inspiradas en principios neoliberales que incentivaron la productividad, la liberalización comercial y la agricultura intensiva (López, 1992). Si bien estas estrategias incrementaron la inversión y la rentabilidad de algunos sectores, también favorecieron la concentración de la tierra, la marginación de pequeños productores y la degradación de los recursos naturales.

Esta orientación se mantuvo en los gobiernos posteriores. Durante la administración de Ernesto Samper (1994-1998), el Plan Nacional de Desarrollo El Salto Social impulsó procesos de reconversión productiva sin resolver los problemas estructurales de concentración de la tierra ni los efectos de la expansión agroindustrial sobre la producción de alimentos (Estrada, 1995). En el gobierno de Andrés Pastrana (1998-2002), las políticas favorecieron la expansión de los agronegocios, incrementando la dependencia de las importaciones de alimentos y la vulnerabilidad frente a los mercados internacionales (Roldán, 2003).

Los gobiernos de Álvaro Uribe Vélez (2002-2010) consolidaron este modelo mediante políticas orientadas a la seguridad y al crecimiento económico. No obstante, como señala Kalmanovitz (2010), la ausencia de una reforma agraria efectiva profundizó la concentración de la tierra y su subutilización, reproduciendo condiciones de pobreza, desigualdad y conflictividad en las zonas rurales. Posteriormente, durante los gobiernos de Juan Manuel Santos (2010-2018), aunque el discurso oficial promovió la transformación del campo y la construcción de paz, la implementación del Ordenamiento Social de la Propiedad Rural (OSPR) fortaleció las dinámicas del latifundio y favoreció los intereses de grandes propietarios y agroindustrias por encima de las necesidades de campesinos y pequeños productores (Martínez, 2021).

Estas políticas tuvieron una expresión concreta en el municipio de Fonseca. Entre 2008 y 2018 se evidencia un cambio progresivo en la estructura productiva, caracterizado

por el crecimiento de cultivos agroindustriales, especialmente las oleaginosas (palma de aceite), y la reducción de cultivos destinados al abastecimiento alimentario (Tabla 3). Mientras la producción de oleaginosas pasó de 0 a 911 toneladas, las hortalizas disminuyeron de 640 a 390 toneladas y los cereales de 5.642 a 4.095 toneladas. Esta transformación refleja la orientación de las políticas públicas hacia la producción de bienes agrícolas destinados al mercado nacional e internacional, en detrimento de la producción agroalimentaria local.

Tabla 3. Producción agrícola de Fonseca.

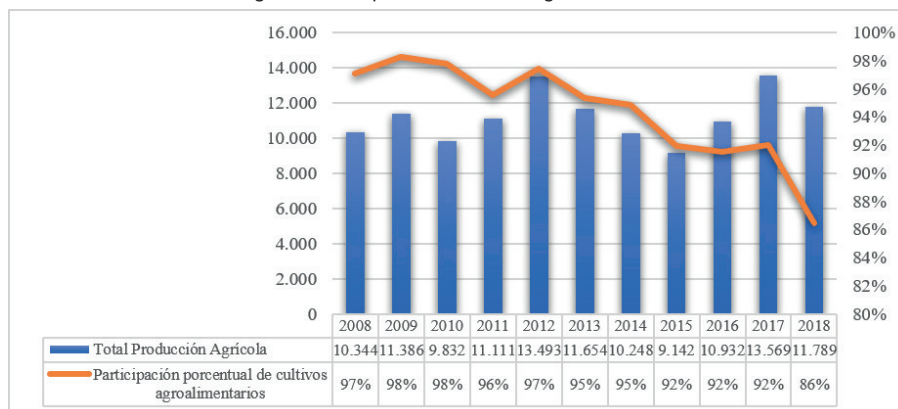
Municipio	Año	Frutales	Hortalizas	Cereales	Leguminosas	Tubérculos y plátanos	Oleaginosas	Fibras	Otros permanentes
Fonseca	2008	475	640	5.642,00	24	3.259,00	0	154	150,4
	2009	693	872	6.072,00	167	3.383,00	0	22,1	177
	2010	724,5	602	5.640,90	183,7	2.464,00	0	0	217,3
	2011	1.071,00	362	6.072,00	69,2	3.044,00	82,8	228,6	180,9
	2012	1.188,00	514	7.960,50	88,2	3.392,00	46	0	303,9
	2013	815	432	6.219,00	82	3.560,00	252	0	293,8
	2014	1.272,00	782	3.880,30	95,8	3.688,00	185	0	344,9
	2015	883	784	4.100,00	73,5	2.566,00	405,3	0	330,4
	2016	842	636	6.262,70	59,1	2.208,00	477,3	90	357,2
	2017	742	598	7.371,00	34,5	3.742,00	662,9	180	238,9
	2018	870	390	4.095,00	28	4.804,00	911	435	256

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Evaluación Agropecuaria (EVA, 2022).

Los testimonios recopilados en el trabajo de campo muestran que estos cambios productivos han tenido efectos directos sobre la vida de la población rural. Los campesinos manifiestan una creciente dificultad para acceder a tierras fértiles y con disponibilidad de agua, situación que limita la continuidad del policultivo y aumenta la dependencia de la producción agroindustrial. Asimismo, asocian la expansión de la palma de aceite con la pérdida de diversidad agrícola, la contaminación del agua y del suelo y la disminución de la autonomía alimentaria (Entrevista a campesino, vereda Cardonal, 2023).

Estas percepciones coinciden con las tendencias observadas en las estadísticas agrícolas. Históricamente, Fonseca ha sido reconocida como la despensa agrícola de La Guajira gracias a la producción diversificada de frutales, hortalizas, cereales, leguminosas y tubérculos que abastecen los mercados locales mediante circuitos cortos de comercialización. Sin embargo, entre 2008 y 2018 la participación de los cultivos agroalimentarios en el total de la producción agrícola disminuyó del 97 % al 86 %, evidenciando un avance progresivo de los cultivos agroindustriales, particularmente de la palma de aceite (Figura 2).

Figura 2. Participación de cultivos agroalimentarios.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Evaluación Agropecuaria (EVA, 2022).

En conjunto, los resultados muestran que las políticas nacionales de desarrollo rural han favorecido la reconfiguración productiva de Fonseca hacia actividades agroindustriales de mayor rentabilidad económica, proceso que ha reducido la diversidad agrícola, fortalecido la concentración de la tierra y debilitado la soberanía alimentaria al limitar la capacidad de las comunidades rurales para producir los alimentos que tradicionalmente garantizaban su abastecimiento y el de la región.

5.2. TERRITORIALIDADES RURALES

Las territorialidades rurales del municipio de Fonseca son el resultado de procesos geosociohistóricos construidos por campesinos, indígenas y productores agrícolas a partir de sus formas de habitar, producir y valorar el territorio. Estas territorialidades se expresan en prácticas productivas, relaciones sociales y representaciones simbólicas que configuran distintas formas de apropiación del espacio. Históricamente, el policultivo ha constituido la base de la soberanía alimentaria local, al permitir el aprovechamiento de las condiciones ambientales y el fortalecimiento de economías de circuitos cortos que abastecen los mercados locales y regionales.

Sin embargo, las transformaciones derivadas de las políticas de desarrollo rural y de la expansión de actividades agroindustriales han generado nuevas relaciones de poder y disputas territoriales. Estas se manifiestan en procesos de concentración de la tierra, deterioro ambiental, desplazamiento de productores tradicionales, escasez alimentaria y adopción de modelos extractivistas como los monocultivos. En este contexto, cada actor social construye una territorialidad particular de acuerdo con sus intereses, formas de producción y relación con la naturaleza.

Los campesinos conciben el territorio como el soporte material y cultural de la vida familiar. Su territorialidad está sustentada en la agricultura de subsistencia, la diversificación de cultivos y el manejo sostenible del suelo, prácticas orientadas a garantizar la producción de alimentos y la conservación de los recursos naturales. Al mismo tiempo, desarrollan procesos organizativos que fortalecen la defensa de sus derechos y la resistencia frente a proyectos que consideran contrarios a sus formas tradicionales de producción.

Como expresa una campesina de la vereda El Confuso: *“Para nosotros, la tierra no es solo nuestro medio de trabajo, es nuestra propia vida... rotamos los cultivos y cuidamos la tierra porque de ella depende la alimentación de nuestras familias.”* En el mismo sentido, otro testimonio evidencia la dimensión política de esta territorialidad: *“Tenemos una asociación donde nos ponemos de acuerdo para defender nuestras costumbres. No queremos que nos impongan la palma; preferimos sembrar yuca, plátano, malanga y maíz.”* (Entrevista a campesina, vereda El Confuso, Fonseca, 2023).

Por su parte, los pueblos indígenas fundamentan su territorialidad en una cosmovisión que integra tierra, agua, cultivos y espiritualidad. La producción agrícola y el uso de los recursos naturales hacen parte de un sistema de conocimientos ancestrales orientado a preservar el equilibrio ambiental y garantizar la continuidad de su identidad cultural. A través de los resguardos y de sus autoridades tradicionales, defienden colectivamente sus derechos territoriales frente al avance de proyectos agroindustriales.

Un líder del resguardo Wayuu de Mayabangloma resume esta visión:

“Nuestra relación con la tierra está unida a nuestras creencias y tradiciones. Sembramos maíz, criamos chivos y cuidamos el agua porque de ella depende nuestra vida. Queremos conservar nuestras costumbres y proteger la tierra de cultivos que deterioran el suelo.” (Entrevista a líder indígena Wayuu, resguardo Mayabangloma, Fonseca, 2023).

En contraste, los medianos productores agrícolas construyen una territorialidad vinculada al fortalecimiento de actividades comerciales, particularmente el monocultivo y la ganadería. Desde esta perspectiva, la incorporación de modelos agroindustriales representa una oportunidad para incrementar la productividad, generar empleo y mejorar la infraestructura productiva, especialmente mediante el acceso al agua para riego. Según un productor asociado a Asoranchería *“Nuestros cultivos generan ingresos y empleo para la región. Con el apoyo a los sistemas de riego buscamos aumentar la producción y aprovechar las oportunidades económicas.”* (Entrevista a mediano productor agrícola, Fonseca, 2023).

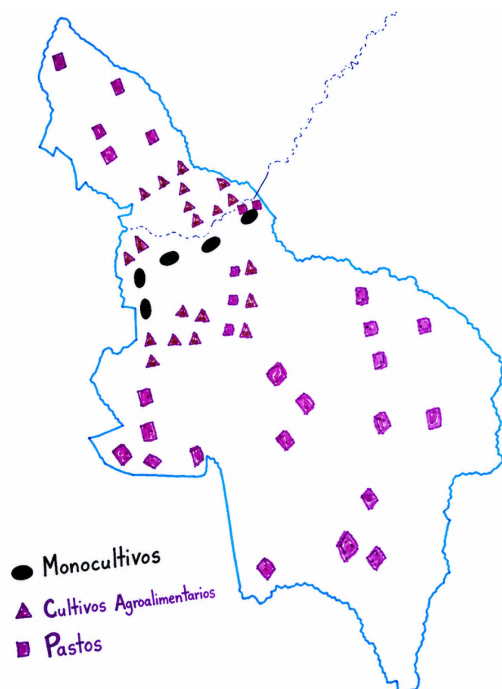
Estas territorialidades reflejan proyectos de desarrollo diferenciados que coexisten y compiten en el mismo espacio rural. Mientras campesinos e indígenas priorizan la producción diversificada, la conservación ambiental y la soberanía alimentaria,

los productores vinculados al agronegocio privilegian la rentabilidad y la expansión de cultivos comerciales. En consecuencia, el territorio de Fonseca se configura como un espacio de disputa donde convergen distintas formas de apropiación, uso y valoración de la tierra, evidenciando las tensiones entre modelos de desarrollo orientados al mercado y aquellos sustentados en la producción agroalimentaria y la permanencia de las comunidades rurales.

5.3. CONFIGURACIÓN DE LA SOBERANÍA ALIMENTARIA

La configuración de la soberanía alimentaria en el municipio de Fonseca está determinada por las disputas en torno al acceso a la tierra y al agua del río Ranchería, principal fuente hídrica de la región. Históricamente, campesinos y pequeños productores han sustentado el abastecimiento alimentario mediante sistemas de policultivo; sin embargo, la expansión de la palma de aceite ha transformado progresivamente esta dinámica. Los monocultivos se han establecido en las áreas con mayor disponibilidad de agua y mejores condiciones productivas, desplazando los cultivos alimentarios hacia zonas más alejadas y menos favorables, con efectos directos sobre la producción local de alimentos y la soberanía alimentaria (Figura 3).

Figura 3. Mapa productivo de Fonseca construido por los pobladores rurales.



Fuente: Elaboración propia a partir del taller realizado en Conejo (2023).

Esta reconfiguración responde a diferentes factores. Algunos productores han incorporado la palma de aceite por considerarla una actividad más rentable, mientras que otros han vendido o arrendado sus predios para facilitar la expansión de los monocultivos. Paralelamente, un grupo de campesinos e indígenas continúa desarrollando sistemas diversificados de producción, pese a las crecientes restricciones para acceder a tierras fértiles y fuentes de agua. Como resultado, el territorio se configura como un espacio de disputa entre proyectos productivos con intereses y formas de apropiación diferenciadas.

Estas relaciones de poder permiten proponer el concepto de escalas territoriales de la soberanía alimentaria, entendido como un proceso dinámico que expresa distintos niveles de control de las comunidades sobre sus sistemas alimentarios. La primera corresponde a la insoberanía alimentaria territorial, caracterizada por la pérdida gradual de capacidad para decidir qué producir, como consecuencia de políticas públicas, presiones económicas o estrategias empresariales que orientan la producción hacia cultivos comerciales. En este nivel, los actores rurales conservan su permanencia en el territorio, pero reducen progresivamente su autonomía sobre las decisiones productivas.

El segundo nivel es la des-soberanía alimentaria territorial, que hace referencia a procesos de despojo y desplazamiento de campesinos y pequeños productores para favorecer la expansión de actividades agroindustriales. Estas transformaciones pueden materializarse mediante mecanismos institucionales, dinámicas de mercado o, en escenarios más críticos, por situaciones de violencia y exclusión social. En consecuencia, las comunidades pierden no solo el control sobre la producción de alimentos, sino también sobre los territorios que históricamente han habitado.

En contraste, la prosoberanía alimentaria territorial representa las estrategias de resistencia desarrolladas por campesinos, indígenas y pequeños productores para conservar el control sobre sus sistemas productivos. Estas acciones incluyen la agricultura familiar, el policultivo, las organizaciones comunitarias y las iniciativas colectivas orientadas a proteger el acceso a la tierra, el agua y la producción diversificada de alimentos, fortaleciendo la autonomía territorial y alimentaria.

Este enfoque se distancia de las perspectivas que interpretan las escalas territoriales únicamente desde las redes económicas, el desarrollo regional o los flujos globales. Por el contrario, retoma los planteamientos de Massey (1984), quien entiende el espacio como una construcción relacional derivada de las condiciones materiales de reproducción y de las relaciones de poder que configuran el territorio. Asimismo, incorpora la propuesta de Lefebvre (1974) sobre la producción social del espacio y la interpretación de Smith (1990), quien demuestra que las transformaciones territoriales responden a la

interacción entre naturaleza, capital y acumulación, configurando escalas atravesadas por intereses económicos y políticos.

Finalmente, las tensiones entre insoberanía, des-soberanía y prosoberanía alimentaria pueden comprenderse a partir de Harvey (2014), quien plantea que el territorio se configura mediante la coexistencia de fuerzas opuestas. En Fonseca, estas disputas enfrentan, por un lado, proyectos orientados a la expansión agroindustrial y, por otro, iniciativas que buscan preservar la producción agroalimentaria, la autonomía comunitaria y el control local sobre los recursos estratégicos. En consecuencia, la soberanía alimentaria emerge como una construcción territorial en permanente transformación, resultado de las relaciones de poder que disputan el uso, el control y el significado del espacio rural.

6. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio muestran que las transformaciones del desarrollo rural en el municipio de Fonseca responden a un proceso de reconfiguración territorial impulsado por políticas públicas que, desde la década de 1990, privilegiaron la competitividad, la modernización agrícola y la expansión del agronegocio. Estas orientaciones favorecieron el crecimiento de cultivos agroindustriales, especialmente la palma de aceite, modificando las formas tradicionales de uso del suelo, la distribución de la tierra y el acceso al agua del río Ranchería, con efectos directos sobre la producción de alimentos y la soberanía alimentaria de la población rural.

El análisis evidencia que las territorialidades rurales constituyen construcciones sociales diferenciadas, configuradas por las relaciones que campesinos, pueblos indígenas y productores agrícolas establecen con el territorio. Mientras campesinos e indígenas sustentan sus prácticas en el policultivo, la agricultura familiar, la conservación de los recursos naturales y la producción de alimentos para el consumo local, los actores vinculados al agronegocio orientan sus estrategias hacia la rentabilidad económica y la producción comercial. Estas visiones expresan proyectos de desarrollo divergentes que convierten al territorio en un escenario permanente de disputas por la tierra, el agua y el control de los sistemas productivos.

Los cambios observados en la estructura agrícola de Fonseca confirman una disminución progresiva de los cultivos destinados al abastecimiento alimentario y un crecimiento sostenido de las oleaginosas, asociado a la implementación de políticas nacionales que promovieron la agricultura intensiva y la inserción en mercados internacionales. Esta transición productiva ha reducido la diversidad agrícola, incrementado la concentración de la tierra y limitado la capacidad de las comunidades para decidir sobre sus sistemas alimentarios, debilitando su autonomía territorial.

Uno de los principales aportes de esta investigación es la formulación del concepto de escalas territoriales de la soberanía alimentaria, entendido como una herramienta analítica para interpretar los distintos niveles de control que las comunidades ejercen sobre la producción de alimentos y los recursos estratégicos del territorio. La insoberanía alimentaria territorial representa la pérdida gradual de autonomía frente a decisiones externas que orientan la producción hacia intereses de mercado; la des-soberanía alimentaria territorial evidencia procesos de despojo y desplazamiento que favorecen la expansión de actividades agroindustriales; y la prosoberanía alimentaria territorial expresa las estrategias de resistencia mediante las cuales campesinos, indígenas y pequeños productores fortalecen la agricultura familiar, el policultivo, la organización comunitaria y la defensa de sus territorios.

Estas escalas no constituyen categorías estáticas, sino procesos dinámicos que coexisten y se superponen en el territorio como resultado de relaciones de poder, políticas públicas y estrategias de apropiación espacial. En consecuencia, la soberanía alimentaria debe entenderse como una construcción territorial en permanente disputa, donde convergen intereses económicos, políticos, ambientales y culturales.

Finalmente, el estudio permite concluir que la sostenibilidad del desarrollo rural en Fonseca requiere políticas públicas que trasciendan el enfoque exclusivamente productivista y reconozcan el papel estratégico de la agricultura campesina, los sistemas diversificados de producción y las organizaciones comunitarias en la conservación de la biodiversidad, el abastecimiento alimentario y la gestión sostenible del agua y la tierra. Fortalecer estos procesos contribuirá no solo a preservar la soberanía alimentaria, sino también a consolidar territorios rurales más equitativos, resilientes y capaces de enfrentar las presiones derivadas de la expansión del extractivismo agrícola.

REFERENCIAS

Aizen, M. A., & Garibaldi, L. A. (2009). **Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina.** *Ecología Austral*, 19(1), 45–54.

Bickel, U., & Dros, J. M. (2003). **The impacts of soybean cultivation on Brazilian ecosystems: Three case studies.** WWF.

Concheiro, L., & Grajales, S. (2009). **Nueva ruralidad y desarrollo territorial: Una perspectiva desde los sujetos sociales.** *Revista Veredas*, (18), 145–167.

Corporación Autónoma Regional de La Guajira (Corpoguajira). (2013). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río Ranchería. <https://corpoguajira.gov.co/wp/pomca-rancheria/>

Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA). (2022). **Evaluaciones Agropecuarias Municipales.**

- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.** <https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge>
- Fajardo, D. (2014). **Las guerras de la agricultura colombiana 1980–2010.** Instituto Latinoamericano para una Sociedad y un Derecho Alternativos (ILSA).
- Favareto, A. (2007). **Paradigmas do desenvolvimento rural em questão.** Iglu/FAPESP.
- Federación Canadiense de Municipalidades. (2017). **Plan de Desarrollo Económico Local para el municipio de Fonseca, La Guajira.** <https://guajira360.org/wp-content/uploads/2018/06/Plan-DEL-Fonseca-FINAL.pdf>
- Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA). (2002). **Estrategia del FIDA para la reducción de la pobreza en América Latina y el Caribe.** FIDA.
- Harvey, D. (2014). **Diecisiete contradicciones y el fin del capitalismo.** Instituto de Altos Estudios Nacionales (IAEN).
- Ibáñez, A. M., Muñoz-Mora, J. C., & Verwimp, P. (2013). **Abandoning Coffee under the Threat of Violence and the Presence of Illicit Crops: Evidence from Colombia** (Documento CEDE 11465). Universidad de los Andes.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2023). **Cartografía de la cuenca del río Ranchería.** IGAC.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2001). **Nueva ruralidad.** <https://repositorio.iica.int/handle/11324/9878>
- Kalmanovitz, S. (2010). **Nueva historia económica de Colombia.** Taurus.
- Kay, C. (2015). **The agrarian question and the neoliberal rural transformation in Latin America.** *European Review of Latin American and Caribbean Studies*, (100), 73–83. <https://doi.org/10.18352/erlacs.10123>
- Lefebvre, H. (1974). **La producción del espacio.** Capitán Swing.
- López, L. F. (1992). **Intervencionismo de Estado y economía en Colombia.** Universidad Externado de Colombia.
- Martínez, J. (2021). **La política de tierras en Colombia durante el gobierno de Juan Manuel Santos (2010–2018): Una complicada estrategia de clase en la disputa por la renta territorial.** *Historia Actual Online*, 54(1), 157–180.
- Massey, D. (1984). **Spatial divisions of labour: Social structures and the geography of production.** Macmillan.
- Nates-Cruz, B. (2020). **Derecho al territorio como base de la justicia cognitiva.** *Disparidades. Revista de Antropología*, 75(1). <https://doi.org/10.3989/dra.2020.001>
- Oxfam. (2016). **Desterrados: Tierra, poder y desigualdad en América Latina.** Oxfam Internacional.
- Pérez Martínez, M. E. (2016). **De los territorios rurales contemporáneos: una lectura teórica en perspectiva de la relación global-local.** *Bitácora Urbano Territorial*, 26(2), 115-124. [doi.org.](https://doi.org/)

Saquet, M. A. (2015). **Por una geografía de las territorialidades y las temporalidades: Una concepción multidimensional orientada a la cooperación y el desarrollo territorial**. Universidad Nacional de La Plata.

Schejtman, A., & Berdegúé, J. A. (2003). **Desarrollo territorial rural**. Rimisp – Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural.

Smith, N. (1990). **Desarrollo desigual: Naturaleza, capital y la producción del espacio**. Traficantes de Sueños.

Toledo, V. M. (1981). **Intercambio ecológico e intercambio económico en el proceso productivo primario**. En E. Leff (Ed.), Biosociología y articulación de las ciencias (pp. 115–147). Universidad Nacional Autónoma de México.

Tuan, Y.-F. (1983). **Espacio y lugar: La perspectiva de la experiencia**. Difel.

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2018). **Análisis de la distribución de la propiedad rural en Colombia**. <https://www.upra.gov.co>

CAPÍTULO 3

CREACIÓN Y DESARROLLO DE UN CENTRO DE PROMOCIÓN AMBIENTAL MATLALCUÉYATL PARA LA RECUPERACIÓN Y CONSERVACIÓN DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS: CASO: ZITLALTEPEC, TLAXCALA, MÉXICO

Data de submissão: 03/08/2026

Data de aceite: 19/08/2026

Fernando Mohedano López

Escuela Superior de Turismo

Instituto Politécnico Nacional

Ciudad de Mexico, México

<https://orcid.org/0000-0003-0894-5642>

RESUMEN: Las Áreas Naturales Protegidas en México enfrentan problemas de conservación y recuperación de sus ecosistemas endémicos y frágiles, como en el caso del Parque Nacional La Malinche y del área natural protegida. El objetivo de esta investigación es generar estrategias y acciones para su conservación y recuperación de manera sistemática e incluyente. Las primeras estrategias utilizadas, fueron talleres informativos, donde se expusieron y se conocieron las necesidades y problemáticas de la comunidad referente a la conservación y regeneración del parque. Estos talleres fueron impartidos por especialistas de la Universidad Autónoma de México, de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y del Instituto Politécnico Nacional. Estos trabajos se realizaron durante varios años.

La metodología utilizada fue el Modelo de Acciones de Socioecogestión Turística que utiliza un enfoque participativo, investigación-acción, usando técnicas de diálogo y construcción colectiva para la recolección de información, con la aplicación y seguimiento del modelo dio como principales resultados la concientización, entendimiento, educación y permanencia de los ecosistemas existentes, ésta opción tuvo el involucramiento de las comunidades locales y el particular interés de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Tlaxcala, actores receptivos a las necesidades del Área Natural Protegida de la Malinche y por tanto la creación y construcción del Centro de Promoción Ambiental Matlalcuéyatl o Malinche, cumpliendo con el propósito de concientizar a visitantes hacia el turismo sosteniblemente regenerativo a través de la impartición de cursos de acciones sosteniblemente regenerativas, cuidado del lugar, reforestación, instalación de cámaras sordas, información ambiental de los ecosistemas existentes de La Malinche, concluyendo que las actividades turísticas sosteniblemente regenerativas son las aproximaciones más cercanas a la conservación y recuperación regenerativa de las Áreas Naturales Protegidas como La Malinche.

PALABRAS CLAVE: desarrollo sostenible; ecoturismo; conservación ambiental; La Malinche; modelo de acciones de sociología cultural.

CREATION AND DEVELOPMENT OF A MATLALCUÉYATL ENVIRONMENTAL PROMOTION CENTER FOR THE RECOVERY AND CONSERVATION OF NATURAL PROTECTED AREAS: CASE: ZITLALTEPEC, TLAXCALA, MEXICO

ABSTRACT: Natural Protected Areas in Mexico face challenges in conserving and recovering their endemic and fragile ecosystems, as in the case of La Malinche National Park and the protected natural area. The objective of this research is to generate strategies and actions for their conservation and recovery in a systematic and inclusive way. The first strategies used were informative workshops, where the community's needs and problems regarding the conservation and regeneration of the park were presented and identified. These workshops were led by specialists from the Autonomous University of Mexico, the Autonomous University of the State of Morelos, and the National Polytechnic Institute. These activities were carried out over several years. The methodology used was the Model of Actions of Tourism Socio-eco-management, which uses a participatory, research-action approach and techniques of dialogue and collective construction for the collection of information. The application and monitoring of the model yielded as main results increased awareness, understanding, education, and the permanence of the existing ecosystems. This option involved local communities and the particular interest of the Secretary of the Environment and Natural Resources of the State of Tlaxcala, actors receptive to the needs of the Malinche Natural Protected Area, and therefore led to the creation and construction of the Matlalcuéyatl or Malinche Environmental Promotion Center, fulfilling the purpose of raising awareness among visitors toward sustainably regenerative tourism through the teaching of courses on sustainably regenerative actions, care of the place, reforestation, installation of deaf cameras, and environmental information on the existing ecosystems of La Malinche. The study concludes that sustainably regenerative tourism activities are the closest approaches to the conservation and regenerative recovery of Natural Protected Areas such as La Malinche.

KEYWORDS: sustainable development; ecotourism; environmental conservation; La Malinche; model of cultural sociology actions.

CRIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM CENTRO DE PROMOÇÃO AMBIENTAL MATLALCUÉYATL PARA A RECUPERAÇÃO E CONSERVAÇÃO DE ÁREAS NATURAIS PROTEGIDAS: CASO: ZITLALTEPEC, TLAXCALA, MÉXICO

RESUMO: As Áreas Naturais Protegidas no México enfrentam problemas de conservação e recuperação de seus ecossistemas endêmicos e frágeis, como no caso do Parque Nacional La Malinche e de outras áreas naturais protegidas. O objetivo desta pesquisa é gerar estratégias e ações para sua conservação e recuperação de forma sistemática e inclusiva. As primeiras estratégias utilizadas foram oficinas informativas, onde as necessidades e problemas da comunidade em relação à conservação e regeneração do parque foram apresentadas e discutidas. Essas oficinas foram ministradas por especialistas da Universidade Autónoma do México, da Universidade Autónoma do Estado de Morelos e do Instituto Nacional Politécnico. Esses trabalhos foram realizados ao longo de vários anos. A metodologia utilizada

foi o Modelo de Ações do Turismo Socio-eco-gestão, que emprega uma abordagem participativa, pesquisa-ação, técnicas de diálogo e construção coletiva para a coleta de informações, com a aplicação e o monitoramento do modelo, que trouxe como principais resultados a conscientização, compreensão, educação e permanência dos ecossistemas existentes; essa iniciativa contou com o envolvimento das comunidades locais e com o interesse particular do Secretário do Meio Ambiente e Recursos Naturais do Estado de Tlaxcala, atores receptivos às necessidades da Área Natural Protegida da Malinche e, portanto, à criação e construção do Centro de Promoção Ambiental de Matlalcuéyatl ou Malinche, cumprindo o propósito de conscientizar os visitantes sobre o turismo regenerativo sustentável por meio do ensino de cursos de ações regenerativas sustentáveis, cuidado do local, reflorestamento, instalação de câmeras para surdos, informações ambientais dos ecossistemas existentes de La Malinche. Conclui-se que as atividades de turismo regenerativo sustentável são as abordagens mais próximas da conservação e recuperação regenerativa de Áreas Naturais Protegidas, como La Malinche.

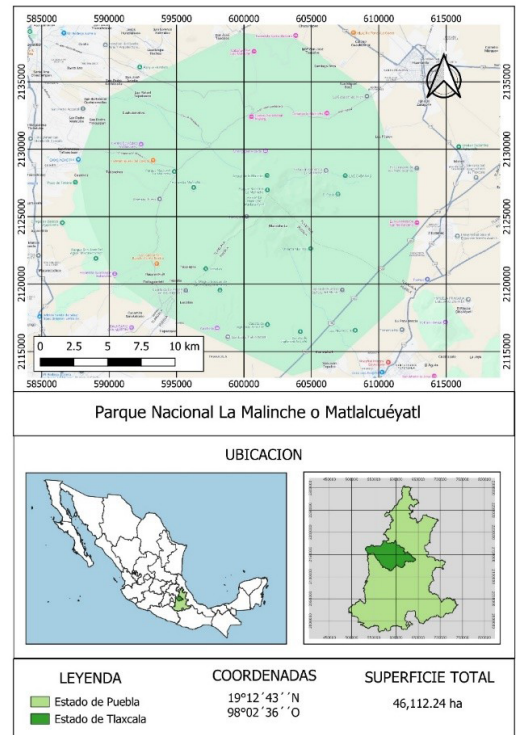
PALAVRAS-CHAVE: desenvolvimento sustentável; ecoturismo; conservação ambiental; La Malinche; modelo de ações de sociologia cultural.

1. INTRODUCCIÓN

Las áreas naturales protegidas en México son territorios o espacios terrestres o acuáticos reconocidos y administrados por el Estado, donde coinciden varios participantes, entre ellos comunidades residentes, estudiosos de los ecosistemas y de la biodiversidad, y responsables de la conservación, por tal motivo, es necesaria la protección de estos espacios del territorio mexicano con el involucramiento activo de todos los actores. (AL AMBIENTE, 2014)

Las áreas naturales protegidas están contempladas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental (LGEEPA) (AL AMBIENTE, 2014), que establece como obligación la participación social en todas las fases de la creación y el manejo de un área natural protegida. La autoridad ambiental federal debe realizar procesos de consulta con los diferentes niveles de gobierno y otras instancias federales, así como con las comunidades residentes y organizaciones sociales, comunitarias, públicas, privadas, de la sociedad civil e instituciones académicas, mediante talleres, reuniones y diversas sesiones de trabajo, con el fin de generar consenso en el área (DE MODALIDADES, #136). El parque Matlalcuéyatl o Malinche, considerado un área natural protegida, se encuentra en el estado de Tlaxcala y en una parte del estado de Puebla, México, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Ubicación del Parque La Malinche, Tlaxcala. México.



Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (García González, 2024 #139). Quantum GIS (QGIS) [software].

Esta investigación es una primera alternativa de solución para mantener, conservar y regenerar las Áreas Naturales Protegidas en México, como la Malinche, aplicando un Modelo de Acciones de Socioecogestión Turística (López, 2022 #143), que permite diagnosticar las características sociales, ecológicas, de gestión y gobernanza existentes en la localidad, proponer actividades en las que se comprometan, participen e involucren los visitantes y/o turistas en actividades que propicien la sostenibilidad, recuperación y regeneración del medio natural y social, así como las costumbres tradicionales de las comunidades locales, llamado turismo sosteniblemente regenerativo.

En el caso de estudio de Zitlaltepec, Tlaxcala, México, se propusieron actividades de turismo sosteniblemente regenerativas, actividades de educación ambiental, talleres de cámaras trampa, entre otras, a la comunidad local y visitantes, iniciando con cursos de capacitación en Turismo Sosteniblemente Regenerativo al grupo comunitario Matlalcuéyatl, continuando con el acompañamiento constante de docentes de la Universidad Autónoma de México, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y el

Instituto Politécnico Nacional, dando como resultado que el grupo comunitario tuviera la necesidad de buscar opciones de solución para conservar y recuperar el área protegida de la Malinche, proponiendo la construcción de un lugar emblemático donde se pudieran realizar estas actividades, como fue la creación y construcción del Centro de Promoción Ambiental Matlalcuéyatl o Malinche.

Las Áreas Naturales Protegidas en México se crean mediante un decreto presidencial en 1917, surgiendo la primer Área Natural Protegida de México¹ cuyos propietarios deciden dedicarse a la conservación y las actividades que pueden llevarse a cabo por la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y programas de ordenamiento ecológico sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo, según categorías establecidas en la Ley; con ello surge una herramienta efectiva para conservar los ecosistemas (Lagunas-Vazques, 2016 #137).

El 6 de octubre de 1938 se decreta Parque Nacional al Volcán Matlalcuéyatl o la Malinche y sus inmediaciones, con el nombramiento de: La Montaña Malinche o Matlecueyatl, designación publicada en el Diario Oficial de la Federación, por decreto de Lázaro Cárdenas quien consideró que por sus contribuciones hídricas y biológicas el sitio debía ser protegido de la explotación y el deterioro provocado por las actividades humanas². En respuesta a la necesidad de asegurar la cobertura vegetal del área con el fin de prevenir la erosión de los suelos y preservar sus condiciones ambientales (Levi, #140).

El Parque Nacional Matlalcuéyatl cuenta con una superficie de 45,711 hectáreas, abarcando los territorios de los estados de Tlaxcala y Puebla, con una distribución de 16 municipios (12 municipios en el territorio de Tlaxcala y 4 municipios en el territorio de Puebla). Este Parque Nacional forma parte de la cadena montañosa conocida como Eje Neovolcánico Transversal; los municipios que forman parte del Parque Nacional la Malinche se mencionan en las Tablas 1 y 2 (CONANP, 2013), ver Figura 2.

¹ Desierto de los Leones, ubicado al suroeste de la Ciudad de México en las alcaldías Cuajimalpa y Álvaro Obregón, que abarca una superficie de 1,525 hectáreas de bosque de pino.

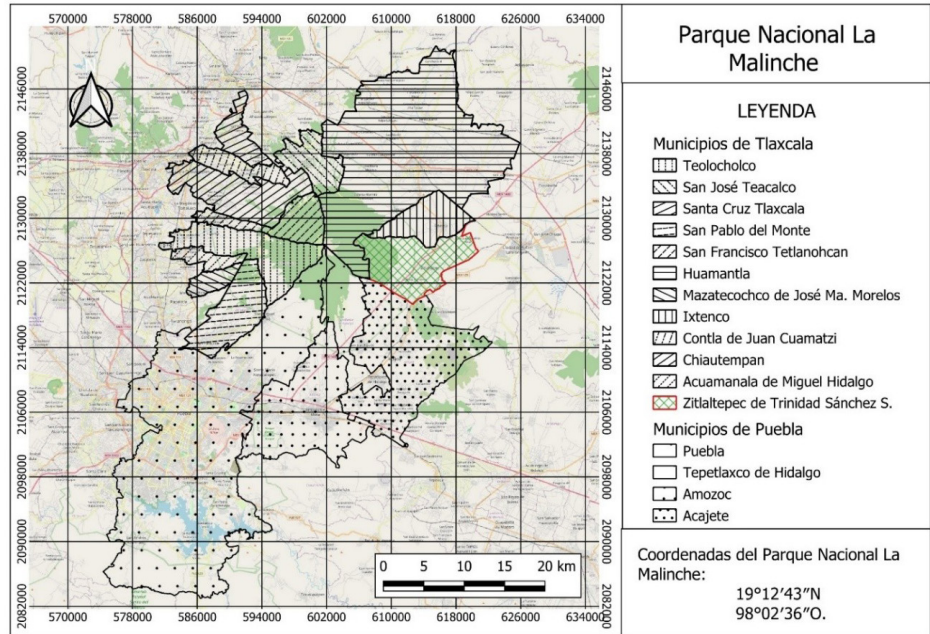
² Para proteger de invasiones y desmontes para la agricultura y pastoreo, y ante la pérdida del hábitat de múltiples especies silvestres causada por la llegada del ferrocarril a principios del siglo XX *ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS DECRETADAS*. (2016). <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/areas-naturales-protegidas-decretadas#:~:text=Se%20crean%20mediante%20un%20decreto,su%20Reglamento%2C%20los%20programas%20de.>

Tabla 2. Municipios que forman parte del Parque Nacional La Malinche (Tlaxcala).

Estado	Municipio
Tlaxcala	Acuamanala de Miguel Hidalgo
	Chiautempan
	Contla de Juan Cuamatzi
	Huamantla
	Ixtenco
	Mazatecochco de José Ma. Morelos
	San Francisco Tetlanohcan
	San José Teacalco
	San Pablo del Monte
	Santa Cruz Tlaxcala
	Teolochocho
	Zitlattepec de Trinidad Sánchez S.
Puebla	Acajete
	Amozoc
	Puebla
	Tepatlxco de Hidalgo

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente de Tlaxcala (2013).

Figura 2. Mapa de Ubicación del Parque Nacional La Malinche.



Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (García González, 2024 #139). Quantum GIS (QGIS) [software].

El Parque Nacional destaca por su gran diversidad de especies y endemismos. De acuerdo con el Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación, el área presenta diferentes tipos de vegetación, como bosque de coníferas, bosque de encino, pastizal y vegetación inducida por la población residente (SEMARNAT, 2013).

Una vista característica del paisaje del Parque Nacional La Malinche se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Parque Nacional La Malinche.



Continuando con el hábitat correspondiente a un área natural protegida, se tienen especies endémicas como: el chupaflor canelo, el zumbador mexicano, el chipe rojo, el zorzal mexicano, el murciélago mula, el saltaparedes, el enebro azul, la víbora de cascabel pigmea mexicana, la salamandra tigre, el vencejo nuca blanca y el mirlo pinto; son algunas especies presentes en el Parque La Malinche.

El Parque Nacional La Malinche se gestiona de manera coordinada con los estados de Tlaxcala y Puebla, mediante una administración supervisada por la CONANP, para desarrollar los programas estratégicos de promoción, planeación, gestión y supervisión de actividades y proyectos que salvaguarden y preserven el Área Natural Protegida. Existen coordinación y apoyo de dependencias; ver Tabla 3.

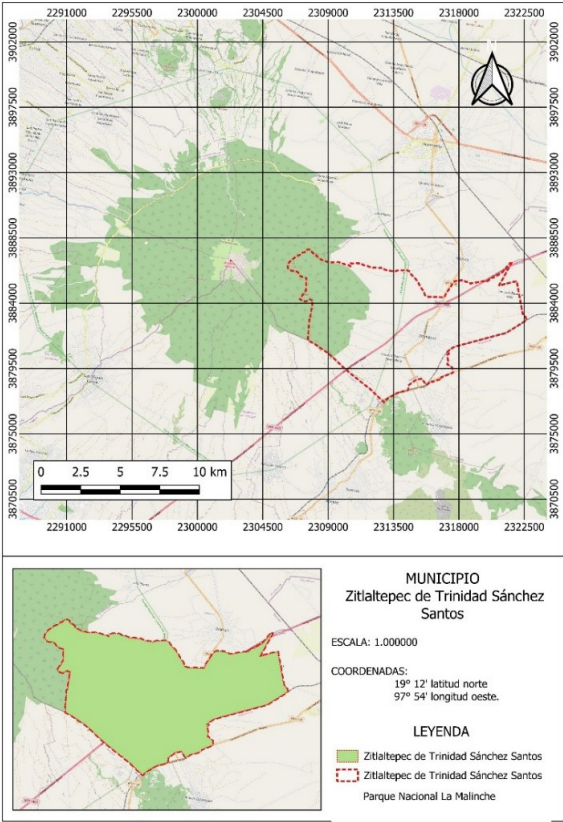
Tabla 3. Organismos y/o instituciones que salvaguardan el Parque Nacional La Malinche o Metlacuayatl.

	Organismo y/o Instituciones
Federal	• Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) • Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) • Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) • Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) • Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio)
Estatat	• Gobierno del estado de Puebla • Delegación Federal de Semarnat en el estado de Puebla • Delegación Federal de Profepa en el estado de Puebla • Comisión Nacional Forestal Gerencia Estatal Puebla • Gobierno del estado de Tlaxcala • Delegación Federal de Semarnat en el estado de Tlaxcala • Delegación Federal de Profepa en el estado de Tlaxcala • Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial • Comisión Nacional Forestal Gerencia Estatal Tlaxcala

Fuente: Programa de Manejo del Parque Nacional La Malinche (2019).

Participantes, con conocimientos empíricos de la gran riqueza ecosistémica existente, durante las reuniones, así también manifestaron las necesidades de apoyo académico y experiencial que les permitan realizar propuestas dirigidas a la conservación del Parque Nacional (PN) de forma sosteniblemente regenerativa, una vez impartida una capacitación sobre actividades de turismo sosteniblemente regenerativas.

Figura 4. Ubicación: Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos, Tlaxcala. México.



Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (García González, 2024 #139). Quantum GIS (QGIS) [software].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada fue el Modelo de Acciones de Socioecogestión Turística, que utiliza un enfoque participativo, investigación-acción, usando técnicas de diálogo y construcción colectiva para la recolección de información (SEMARNAT, 2013), aplicada en diversos casos de recuperación y conservación de los ecosistemas y saberes tradicionales, que ha permitido disminuir impactos y riesgos hacia la sociedad, el medio natural y los saberes tradicionales. Este modelo proviene de un análisis crítico de modelos

de conservación y recuperación de diferentes ecosistemas, complementado con el turismo sosteniblemente regenerativo y formas de remediación biotecnológica. Este modelo se aplicó durante el desarrollo del trabajo en cuestión.

La participación de la comunidad es de suma importancia para la preservación del Parque Natural La Montaña Malinche o Matlecueyatl ya que son los responsables del cuidado del Parque junto con las instancias gubernamentales, las comunidades son generadores de actividades no invasivas, con monitores comunitarios, los vigilantes, gestionan la autorización de actividades en el área ante las instancias de gobierno, como senderismo, ciclismo de montaña, paisajismo, entre otras; en el Parque Natural La Montaña Malinche o Matlecueyatl por sitios autorizados por autoridades municipales y federales.

La comunidad local de La Malinche, y en particular la de Zitlaltepec, de Trinidad Sánchez Santos, municipio del estado de Tlaxcala, ubicado al suroeste de las faldas del volcán La Malinche, ha manifestado a los académicos apoyo en gestión ante instituciones estatales y municipales con el objetivo de aplicar los pasos del Modelo, que a continuación se detallan:

1. Detectar y delimitar el área propuesta para la implementación de conservación y recuperación del área natural protegida “La Malinche” a partir de la investigación de:
 - 1.1. Situación legal y limitaciones del lugar.
 - 1.2. Condiciones existentes en la zona de estudio.
2. Confirmar el interés por realizar actividades de turismo sosteniblemente regenerativo, siempre en la búsqueda del consenso de la comunidad y sensibilización de la población local y autoridades.
3. Identificar accesos en conjunto con la comunidad local y autoridades que eviten la contaminación de cualquier índole del sitio.
4. Determinar el tipo de territorio para su cuidado y ajuste de restricciones de ser necesario, en conjunto con biólogos y autoridades.
5. Identificar el perfil del público que asiste o asistirá al sitio propuesto para realizar actividades de manera sosteniblemente regenerativa
6. Capacitar y sensibilizar a la comunidad local de la importancia del cuidado del Parque La Malinche de forma sosteniblemente regenerativa.
7. Seleccionar o auto propuesta de integrantes de la comunidad como monitores comunitarios de acompañamiento al turista y autorización de esta figura por la autoridad de Tlaxcala.

8. Priorizar las actividades iniciales y que elementos se necesitan para su realización.
9. Planear, coordinar y organizar las actividades de turismo regenerativo adicionales o complementarias como apoyo a las comunidades locales, definiendo los elementos necesarios para realizarlas, responsables, cronogramas indispensables para beneficiar los sectores sociales y ecológicos.
10. Implementar las actividades de turismo sosteniblemente regenerativas en comunión con la comunidad local y responsable de realizar estas actividades.
11. Desarrollar estrategias que difundan en redes y otros medios de actividades sosteniblemente regenerativas dirigidas hacia un mercado específico determinado por el perfil del visitante.
12. Seguir y refrescar estratégicamente las propuestas de actividades sosteniblemente regenerativas provenientes de la comunidad y consensuadas con los expertos.
13. Evaluar la incidencia del turismo sostenible y regenerativo especializado en el medio ambiente, orientado a la mitigación de riesgos naturales en el sitio o territorio.

3. RESULTADOS

Esta investigación cumplió con el objetivo del trabajo que fue generar estrategias y acciones como la capacitación en turismo sosteniblemente regenerativo por especialistas de la Universidad Autónoma de México, Universidad Autónoma del Estado de Morelos y del Instituto Politécnico Nacional a través de vinculación académica con la comunidad y gestión institucional en el tema, que permitió la concientización, entendimiento, educación y permanencia de los ecosistemas existentes, ésta opción tuvo el involucramiento de las comunidades locales y el particular interés de la Secretaría de Medio Ambiente.

Se propusieron actividades que se iniciaron colectivamente en la Malinche. Se construyó la recolección de información, proponiendo actividades de senderismo interpretativo gestionadas ante la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), paseos en bicicleta de montaña, entre otras.

Se establecieron actores operativos locales, como los líderes de la comunidad de Zitlaltepec y de Trinidad Sánchez Santos, principales responsables de las actividades de turismo sostenible y regenerativo, así como la participación de funcionarios de la CONANP, lo que generó una intervención en la comunidad y fortaleció su empoderamiento.

Aplicando este enfoque participativo y pasos del Modelo de Acciones de Socioecogestión Turística, la comunidad decidió en conjunto con las autoridades estatales, municipales y académicas la creación y construcción del Centro de Promoción Ambiental Matlalcuéyatl, también llamado Museo de la Malinche.

Este Centro o Museo ha permitido el conocimiento de la flora y fauna del Parque, clases de ecoturismo del Parque, cursos de conservación y regeneración de la Malinche, todas ellas dirigidas a visitantes, estudiantes de la zona y turistas que llegan al Parque, así también la explicación de senderos interpretativos reglamentados por la autoridad, siendo estas, estrategias turísticas emanadas y consensadas por la comunidad con esta implementación se busca concientizar a visitantes hacia el turismo sosteniblemente regenerativo.

Algunos de los resultados obtenidos por el grupo comunitario Matlalcuéyatl con la asesoría de los académicos fueron:

- Ingreso al Programa para la protección y restauración de ecosistemas y especies prioritarias “PROREST” ejercicio fiscal 2023
 - Comité de vigilancia y monitoreo comunitario
 - Restauración del hábitat terrestre
- Ingreso al Programa para la protección y restauración de ecosistemas y especies prioritarias “PROREST” ejercicio fiscal 2022
 - Restauración del hábitat terrestre
 - Programa sembrando vida
- Participación en servicios de guía de montaña en el Parque Natural La Malinche, autorización emitida por CONANP

El grupo Matlalcuéyatl, a través de cursos de turismo sosteniblemente regenerativo, se concientizó, entendió y fortaleció la comprensión ambiental que ya se tenía, pero ahora con el acompañamiento y dirección de los investigadores, sobre todo de los ecosistemas existentes en el Parque Natural La Malinche, adicionalmente con el apoyo e interés de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). Pretendiendo facilitar la concentración de grupos escolares, turistas y otros actores interesados en la conservación del entorno.

Las acciones realizadas para la recuperación y conservación de los ecosistemas existentes en las áreas naturales protegidas del Parque La Malinche, llevadas a cabo por el grupo comunitario de Zitlaltepec de forma empírica y con el acompañamiento de académicos durante recorridos por senderos interpretativos avalados por la CONANP,

quienes identificaron flora y fauna del Parque La Malinche con especies no vulnerables, generando la conservación y regeneración del medio natural de La Malinche.

El museo se construyó orientado al trayecto solar y a la vista panorámica de la Malinche. Se diseñó en torno a un patio con reloj solar central, dividiéndose en 3 etapas.

- Sala de usos múltiples (100 de construcción) (Ya ejecutada e inaugurada)

1ª ETAPA

- Espacio versátil que permita realizar diversas actividades con el cambio de mobiliario, ya sea para conferencias o asambleas, cursos y talleres, o que sirva como hostel para acoger a turistas y voluntarios que participan en el Centro de Cultura Ambiental.
- Museo (100 de construcción) (En proceso de realización) 2ª ETAPA
 - Museo Edificio: Concientización mediante la educación ambiental con salas de exposiciones, talleres de museografía con bodega, cafetería, almacén, tienda y taquilla ecológica.
 - Museo Abierto o territorio: Turismo sosteniblemente regenerativo, 3ª etapa.
- Escenario (120) (En proceso de realización)
 - Reloj solar y observatorio astronómico
 - Lugar para el eco-emprendimiento, espectáculos, eventos y festivales.

Etapas mostradas en la Figura 5.

Figura 5. Etapas del Proyecto.



Fuente: Elaboración: propia.

4. DISCUSIÓN

El Museo Ecológico Matlalcuéyatl, o Museo La Malinche, es el resultado de inquietudes empíricas de la comunidad local, orientadas académicamente, que permiten que la comunidad se convierta en un agente de cambio, propiciando conciencia y acción local y turística en bosques y manantiales. Este museo confirmó el objetivo de la investigación.

El Museo La Malinche confirma el cumplimiento del objetivo de la investigación en relación con la estrategia y acciones para la conservación y regeneración del Área Natural Protegida o Parque La Malinche, como son los cursos de ecoturismo dentro del sitio, cursos informativos de eco emprendimiento para la comunidad local con el objetivo de regenerar áreas naturales. Este museo tiene implicaciones socioambientales territoriales relevantes para la comunidad local y los visitantes en relación con la conservación del medio ambiente del parque, reforzando la importancia de integrar enfoques de gestión del paisaje con la participación comunitaria, de los visitantes y el impulso a la conservación biocultural.

El modelo museístico, junto con el Modelo de Acciones de Socioecogestión Turística, busca gestionar el turismo de manera regenerativo y la educación ambiental mediante dos componentes clave: el museo-territorio, encargado de promover el turismo de manera regenerativo, y el museo-edificio, enfocado en la educación ambiental.

Figura 6. Modelo Museístico.



Fuente: elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió analizar la importancia de contar con un lugar como el Museo de la Malinche, ubicado en el mismo sitio, con el objetivo de constituir una

estrategia que propicie una educación biocultural, esto es, cultural y ambiental, mediante la capacitación en acciones de turismo regenerativo y sostenible que contribuyen a la conservación y restauración del ecosistema de la Malinche.

En primer lugar, se evidenció empíricamente la tendencia de las sociedades a participar en actividades relacionadas con la naturaleza y los saberes tradicionales. Esta afirmación proviene del incremento del aforo en el Museo día con día: entre semana, con grupos escolares; y los fines de semana, con familias, así como de la llegada de algunos visitantes.

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de desarrollar un modelo museístico que gestione el turismo sosteniblemente regenerativo y la educación ambiental a través de dos componentes clave: el museo-territorio, encargado de promover el turismo sosteniblemente regenerativo, y el museo-edificio, enfocado en la educación ambiental, como el Museo Malinche.

Desde una perspectiva socioecológica, implica que tanto la sociedad como el planeta requieren enfoques integrales que articulen dimensiones ambientales, sociales y territoriales que involucren el interior de la persona, la sociedad y su entorno para intentar lograr una mayor armonía entre estos actores, concientizándoles de las repercusiones que tienen la degradación y depredación del entorno.

Este estudio presenta limitaciones asociadas con los representantes o funcionarios de los municipios con relación a permisos del gobierno, derechos de agua, entre otros, en el lugar donde se encuentra el Museo y sus alrededores, se recomienda que en futuras investigaciones de manera paralela se involucren e incorporen a las autoridades correspondientes con el propósito de realizar las investigaciones a otras escalas o territorios con el fin de consolidar el conocimiento generado y beneficios a las comunidades involucradas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdullah, M. M., Assi, A. T., Abdullah, M. T., & Feagin, R. A. (2020). Arid ecosystem resilience to total petroleum hydrocarbons disturbance: A case-study from the State of Kuwait associated with the Second Gulf War [Article]. *Land Degradation and Development*, 31(2), 155–167. <https://doi.org/10.1002/ldr.3435>

Adimassu, Z., & Tamene, L. (2023). Benefits of selected land management practices on ecosystem services: case studies in four watersheds of Ethiopia [Article]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 1919–1936. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04136-5>

AL AMBIENTE, E. M. D. Á. (2014). Reglamento de la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en materia de áreas naturales protegidas.

CONANP. (2016). *Áreas naturales protegidas decretadas*. Gobierno de México. Revisada 14 de enero from <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/areas-naturales-protegidas-decretadas#:~:text=Se%20crean%20mediante%20un%20decreto,su%20Reglamento%2C%20>

los%20programas%20de.CONANP, S. (2013). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Volcán Tacaná. *Mexico City: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas*.

Crossfield, A., & Ferranti, E. J. S. (2024). A longitudinal perspective of climate adaptation from the UK water sector, 2013–2023 [Article]. *Infrastructure Asset Management*, 11(2), 108–118. <https://doi.org/10.1680/jinam.23.00060>

de Souza, J. M., Morgado, P., da Costa, E. M., & de Novaes Vianna, L. F. (2022). Modeling of Land Use and Land Cover (LULC) Change Based on Artificial Neural Networks for the Chapecó River Ecological Corridor, Santa Catarina/Brazil [Article]. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7), Article 4038. <https://doi.org/10.3390/su14074038>

Esquivel-Solís, R. s/f. Sistema de información, monitoreo y evaluación para la conservación. *Hacia una evaluación de las áreas naturales protegidas del trópico mexicano. Universidad Veracruzana. Centro de Investigaciones Tropicales. Xalapa, Veracruz, México*, 25–34.

Ficha SIMEC - La montaña Malinche o Matlalcuéyatl. (de Souza et al.). <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=101®=7>

Lagunas-Vazques, M., Beltrán-Morales¹, L. F., Bobadilla-Jiménez¹, M., & Or, A. (2016). Población humana, actividades socioeconómicas y problemáticas socioambientales de las Áreas Naturales Protegidas (Nakbanpote et al.) de México. *Áreas Naturales Protegidas Scripta*, 2(Abdullah et al.), 9–34.

Levi, L. L., Ferreira, A. C., & Cador, C. M. ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS EN MÉXICO: ENTRE LA DEPREDACIÓN Y LA CONSERVACIÓN. *PARQUES NACIONALES*, 19.

López, F. M., & Martínez, F. R. (2022). Modelo de acciones de socioecogestión para recuperación y conservación del paisaje del humedal de Tecocomulco. *Ecovida: Revista científica sobre diversidad biológica y su gestión integrada*, 12(1), 44–63.

Nakbanpote, W., Jitto, P., Taya, U., & Prasad, M. N. V. (2023). Chrysopogon zizanioides (vetiver grass) for abandoned mine restoration and phytoremediation: Cogeneration of economical products. In *Bioremediation and Bioeconomy: a Circular Economy Approach, Second Edition* (pp. 385–417). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16120-9.00024-8>

Parque Nacional Malinche o Matlalcuéyatl. *Secretaria de Medio Ambiente de Tlaxcala* <http://sma.tlaxcala.gob.mx/docs/malinche.pdf>

Programa de Manejo. Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl (Crossfield & Ferranti). *PDF*. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/101_libro_pm.pdf

SMA-Tlaxcala. (2013). Parque Nacional La Malinche. Gobierno de Mexico. Revisado 15 de enero en: <http://sma.tlaxcala.gob.mx/docs/malinche.pdf>

SEMARNAT. (2013). Programa de Manejo Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Revisado enero 15 en: https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/101_libro_pm.pdf

Spencer, A. (2015). *Microondas La Cumbre*. https://ebird.org/species/cinhum1?siteLanguage=es_MX

Trimble, J. (2019). *Colibrí de Eloísa. Selasphorus heloisa*. https://ebird.org/species/bumhum?siteLanguage=es_MX

Villalobos, I. (2000). Áreas naturales protegidas: instrumento estratégico para la conservación de la biodiversidad. *Gaceta ecológica*(54), 24–34.

CAPÍTULO 4

AGRICULTURA REGENERATIVA: PRINCIPIOS Y PRÁCTICAS PARA RECUPERAR EL SUELO Y FORTALECER LOS AGROECOSISTEMAS

Data de submissão: 01/09/2026

Data de aceite: 16/09/2026

Eugenio Carrillo-Ávila

Colegio de Postgraduados

Campus Campeche

Carretera Federal

Haltunchén-Edzna, km 17.5

Sihochac, Municipio de Champotón

C.P. 24450

Campeche, México

Benigno Rivera-Hernández

Programa Estancias Posdoctorales
Nacionales para los Investigadores por
México Secretaría de Ciencia,
Humanidades, Tecnología e
Innovación (SECIHTI)

José Jesús Obrador-Ólán

Colegio de Postgraduados
Campus Tabasco
Periférico Carlos A. Molina s/n km 3 carr.
Cárdenas-Huimanguillo, C.P. 86500
H. Cárdenas, Tabasco, México

Eustolia García-López

Colegio de Postgraduados
Campus Tabasco
Periférico Carlos A. Molina s/n km 3 carr.
Cárdenas-Huimanguillo, C.P. 86500
H. Cárdenas, Tabasco, México

José Francisco Juárez-López

Colegio de Postgraduados
Campus Tabasco
Periférico Carlos A. Molina s/n km 3 carr.
Cárdenas-Huimanguillo, C.P. 86500
H. Cárdenas, Tabasco, México

RESUMEN: Este capítulo tiene como objetivo explicar la evolución conceptual, los fundamentos ecológicos y biofísicos, las principales prácticas y los resultados asociados con la agricultura regenerativa, destacando su potencial para construir agroecosistemas más productivos, resilientes y sostenibles. Una de sus principales aportaciones es presentar la agricultura regenerativa como un enfoque sistémico orientado a recuperar la salud y funcionalidad del suelo, en lugar de entenderla únicamente como un conjunto de prácticas. El capítulo identifica cinco principios fundamentales: reducir la perturbación del suelo, mantenerlo cubierto, conservar raíces vivas, promover la diversidad e integrar animales de manera planificada. Estos principios pueden aplicarse mediante diferentes estrategias y deben adaptarse a las condiciones particulares de cada sistema productivo. Asimismo, se explican las bases ecológicas que sustentan la regeneración, destacando el papel del carbono orgánico,

la biodiversidad edáfica, la estructura del suelo, la regulación del agua y el reciclaje de nutrientes. Otra aportación relevante es mostrar que los beneficios aumentan cuando las prácticas interactúan y generan sinergias entre procesos físicos, químicos y biológicos. Finalmente, el capítulo analiza los beneficios económicos, ambientales y sociales, reconociendo resultados favorables, pero también sus limitaciones y la necesidad de mayor evidencia a largo plazo. En conjunto, plantea la agricultura regenerativa como un sistema adaptativo, cuyo éxito depende de su evaluación y ajuste al contexto local.

PALABRAS CLAVE: agricultura regenerativa; salud del suelo; biodiversidad edáfica; resiliencia agroecológica; sostenibilidad agrícola.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando pensamos en agricultura, imaginamos semillas, plantas, agua y cosechas, pero pocas veces consideramos lo que ocurre bajo nuestros pies. El suelo es uno de los recursos fundamentales para producir alimentos. No solo sostiene a las plantas: alberga millones de organismos y procesos que permiten almacenar agua, reciclar nutrientes y favorecer su crecimiento. Bacterias, hongos, lombrices y otros organismos interactúan con las raíces y contribuyen a descomponer los restos vegetales. Sin embargo, la erosión, pérdida de materia orgánica, compactación y manejo inadecuado del agua pueden degradarlo y reducir su capacidad productiva.

Ante esta situación, la agricultura regenerativa ha cobrado interés. Este enfoque busca superar la extracción de recursos y promover prácticas que recuperen la salud del suelo agrícola, conserven sus funciones naturales y favorezcan una producción de alimentos más sostenible. El objetivo de este documento es explicar, de manera clara y accesible, las bases ecológicas y biofísicas de la agricultura regenerativa, integrando conocimientos sobre las relaciones e interacciones entre el suelo, las plantas, los microorganismos, los animales y las personas. Asimismo, se busca facilitar la comprensión de estos procesos mediante la elaboración de figuras y esquemas conceptuales que permitan visualizar y relacionar los diferentes componentes del sistema agrícola, contribuyendo a organizar y hacer más accesible un conocimiento que se encuentra disperso y que ha sido poco representado de manera integrada para fines de divulgación.

2. DEFINICIÓN Y EVOLUCIÓN CONCEPTUAL DE LA AGRICULTURA REGENERATIVA

Aunque todavía no existe una definición única de agricultura regenerativa, las distintas propuestas coinciden en una idea fundamental: producir alimentos mientras se recuperan y mantienen los procesos naturales que hacen posible el funcionamiento de los agroecosistemas. En este sentido, la agricultura regenerativa busca mejorar la salud

del suelo, favorecer la biodiversidad, reciclar los nutrientes y aumentar la capacidad de los sistemas agrícolas para enfrentar sequías, cambios climáticos y otras perturbaciones (Newton et al., 2020).

A diferencia de otros enfoques que pueden definirse por un conjunto específico de prácticas, la agricultura regenerativa presta especial atención a los resultados que se obtienen en el agroecosistema. Por ello, prácticas como reducir la alteración del suelo, mantenerlo cubierto, diversificar los cultivos, favorecer la actividad biológica y reciclar nutrientes son medios para alcanzar una condición más saludable y funcional del sistema, y no necesariamente reglas que deban aplicarse de la misma manera en todas las fincas (Giller et al., 2021).

El concepto también ha evolucionado con el tiempo. Rhodes (2017) propuso una visión amplia basada en el uso eficiente de los recursos, la prevención del deterioro del suelo y el almacenamiento de carbono. Posteriormente, Schreefel et al. (2020) relacionaron la salud del suelo con la recuperación de los servicios que los ecosistemas proporcionan a la sociedad, incorporando además las dimensiones ambiental, económica y social. En México, Sánchez-García (2021) amplió esta perspectiva al considerar el uso de tecnologías, la producción de alimentos seguros y nutritivos y la conservación de los recursos suelo, agua y aire.

En conjunto, estas aportaciones permiten entender la agricultura regenerativa como un enfoque sistémico cuyo punto de partida es la recuperación de la salud del suelo. Para ello, busca fortalecer la biodiversidad, aumentar la materia orgánica, mejorar el reciclaje de nutrientes y favorecer la captura de carbono, sin perder de vista la productividad, la rentabilidad y el bienestar de las personas. Su propósito último es contar con tierras más fértiles y productivas que, al mismo tiempo, contribuyan a proteger los medios de vida de quienes las trabajan (Nasukawa et al., 2025).

La evolución reciente del concepto también muestra que la agricultura regenerativa no necesariamente se limita a la agricultura ecológica. Su criterio central es que las prácticas contribuyan a mejorar el funcionamiento y la sostenibilidad del sistema. Por ello, puede incorporar tecnologías e insumos sintéticos cuando se considere que su uso es compatible con esos objetivos (Roberts et al., 2026). Esta flexibilidad es una de las características que explican tanto el interés creciente por la agricultura regenerativa como el debate sobre sus límites y su definición.

3. CINCO PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA REGENERAR EL SUELO

La agricultura regenerativa parte de una idea sencilla: un suelo sano es la base de un agroecosistema productivo y duradero. Para lograrlo, propone manejar la tierra

de manera que sus procesos naturales puedan conservarse, recuperarse y fortalecerse. En este enfoque es importante distinguir entre principios y prácticas. Los principios indican qué procesos se desea favorecer; las prácticas son las formas concretas de manejo que permiten conseguirlo. Por esta razón, una misma práctica puede contribuir a varios principios y adaptarse de distintas maneras según las condiciones de cada finca (Schreefel et al., 2020; Beacham et al., 2023; Mambo y Lhermie, 2024).

3.1. REDUCIR LA PERTURBACIÓN DEL SUELO

El suelo no es un material inerte. En su interior existe una compleja red formada por raíces, microorganismos, hongos, poros y agregados que permiten el movimiento del agua y el aire y sostienen la vida. La labranza intensiva puede alterar esta estructura y afectar a los organismos que la habitan. Por ello, la agricultura regenerativa busca reducir al mínimo las alteraciones innecesarias del suelo y favorecer su recuperación natural.

3.2. MANTENER EL SUELO CUBIERTO

Un suelo desnudo queda expuesto a la lluvia, el viento, la radiación solar y los cambios extremos de temperatura. Una cubierta vegetal o una capa de residuos de cosecha actúa como una protección natural. Además de reducir la erosión, ayuda a conservar la humedad y favorece la incorporación gradual de materia orgánica al suelo.

3.3. MANTENER RAÍCES VIVAS

Las raíces cumplen una función que va mucho más allá de sostener a las plantas. Mientras están activas, liberan compuestos que alimentan a numerosos microorganismos del suelo. Estos organismos participan en la descomposición de la materia orgánica y en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Las raíces también establecen relaciones con hongos micorrícicos que pueden ayudar a las plantas a obtener agua y nutrientes. Por ello, mantener raíces vivas durante el mayor tiempo posible contribuye a mantener activa la vida del suelo.

3.4. PROMOVER LA DIVERSIDAD

La naturaleza rara vez funciona con una sola especie. Los sistemas diversos contienen diferentes plantas, microorganismos y animales que interactúan entre sí y cumplen distintas funciones. La agricultura regenerativa busca aprovechar estas relaciones mediante rotaciones, cultivos asociados, policultivos y cultivos de cobertura.

La diversidad puede mejorar el aprovechamiento de los recursos, favorecer la vida del suelo y aumentar la estabilidad del agroecosistema.

3.5. INTEGRAR ANIMALES DE MANERA PLANIFICADA

Los animales pueden formar parte del proceso de regeneración cuando su presencia se maneja adecuadamente. El pastoreo controlado permite aprovechar la biomasa de las praderas, incorporar materia orgánica y devolver nutrientes al suelo. Además, los periodos de descanso permiten que la vegetación se recupere. La integración agricultura–ganadería debe realizarse de acuerdo con la capacidad de carga del terreno, evitando el sobrepastoreo y la degradación.

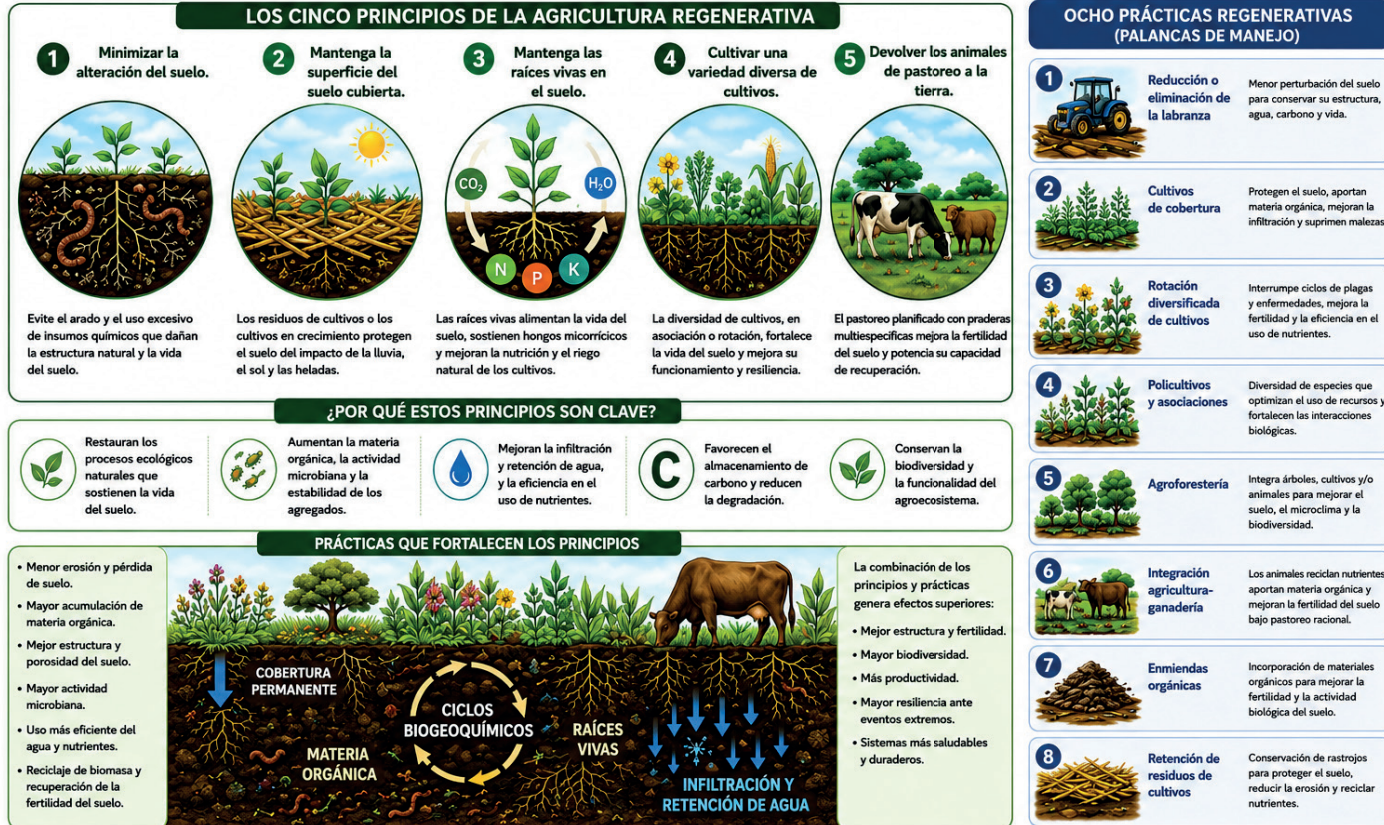
Estos cinco principios se relacionan entre sí y pueden ponerse en práctica mediante diferentes palancas de manejo: reducción o eliminación de la labranza, cultivos de cobertura, rotaciones diversificadas, policultivos y asociaciones, agroforestería, uso de enmiendas orgánicas, retención de residuos de cosecha e integración agricultura–ganadería. No se trata de aplicar todas estas prácticas al mismo tiempo ni de seguir una receta única. Su elección debe responder a las características del suelo, el clima, los cultivos y las condiciones de cada sistema productivo.

La Figura 1 representa esta relación entre principios y prácticas. Su aplicación conjunta puede generar efectos que se refuerzan mutuamente: mayor incorporación de materia orgánica, actividad biológica más intensa, mejor estabilidad de los agregados, mayor infiltración y retención de agua y un reciclaje más eficiente de los nutrientes (FAO, 2021; Pretty, 2021).

En conjunto, los cinco principios permiten comprender la agricultura regenerativa como un proceso de recuperación de las funciones del suelo, más que como un simple conjunto de técnicas. Cuando el suelo conserva su estructura, mantiene humedad, alberga una comunidad diversa de organismos y recibe continuamente materia orgánica y nutrientes, aumenta su capacidad para sostener los cultivos. Así, la regeneración del suelo se convierte en el punto de partida para construir agroecosistemas más productivos, estables y capaces de mantenerse en el largo plazo.

Figura 1. Relación entre principios y prácticas regenerativas.

CINCO PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA REGENERAR EL SUELO



Fuente: Elaboración propia con base en Schreefel et al. (2020), Giller et al. (2021), Pretty (2021), Beacham et al. (2023), Mambo & Lhermie (2024), Nasukawa et al. (2025).

4. BASES ECOLÓGICAS Y BIOFÍSICAS DE LA AGRICULTURA REGENERATIVA

La agricultura regenerativa considera al suelo como un ecosistema vivo, dinámico y complejo, donde interactúan minerales, materia orgánica, agua, raíces y comunidades microbianas. La Figura 2, sintetiza estas bases ecológicas y biofísicas, destacando la interdependencia entre los componentes del suelo y procesos como el reciclaje de nutrientes, la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono. Desde esta perspectiva, la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas dependen de conservar y favorecer los procesos ecológicos que mantienen su funcionalidad, en lugar de degradarlos mediante prácticas de manejo intensivo (Lehmann et al., 2020).

El carbono orgánico del suelo constituye uno de los principales componentes de este enfoque, debido a su relación con la calidad y funcionalidad edáfica. La materia orgánica proporciona energía a los microorganismos y participa en la formación y estabilidad de agregados, la retención de humedad, el intercambio catiónico y la disponibilidad gradual de nutrientes. Asimismo, el incremento del carbono orgánico puede favorecer el secuestro de carbono atmosférico, contribuyendo tanto a la fertilidad del suelo como a la mitigación del cambio climático. Por ello, su acumulación constituye un componente relevante para incrementar la productividad y resiliencia de los sistemas agrícolas ante condiciones ambientales adversas (Lal, 2020; IPCC, 2022).

La biodiversidad edáfica representa otro componente fundamental. Bacterias, hongos, arqueas, protozoarios, nematodos y otros organismos establecen interacciones entre sí y con las raíces, particularmente en la rizosfera. Los exudados radicales estimulan la actividad microbiana y favorecen asociaciones mutualistas, como las micorrizas y las bacterias fijadoras de nitrógeno. Estas interacciones participan en el reciclaje de nutrientes, la adquisición de agua y elementos minerales y la regulación natural de organismos potencialmente patógenos. En consecuencia, la diversidad y actividad biológica del suelo constituyen elementos centrales para mantener su estabilidad y capacidad funcional (Lehmann et al., 2020; FAO, 2021).

La estructura del suelo y la regulación del agua también están estrechamente vinculadas con los procesos regenerativos. La reducción del disturbio mecánico, la incorporación de residuos vegetales y el aumento de materia orgánica favorecen la estabilidad de los agregados y la formación de poros asociados con raíces y organismos edáficos. Esto puede incrementar la infiltración y almacenamiento de agua, reducir la escorrentía y la erosión y mejorar la disponibilidad hídrica para los

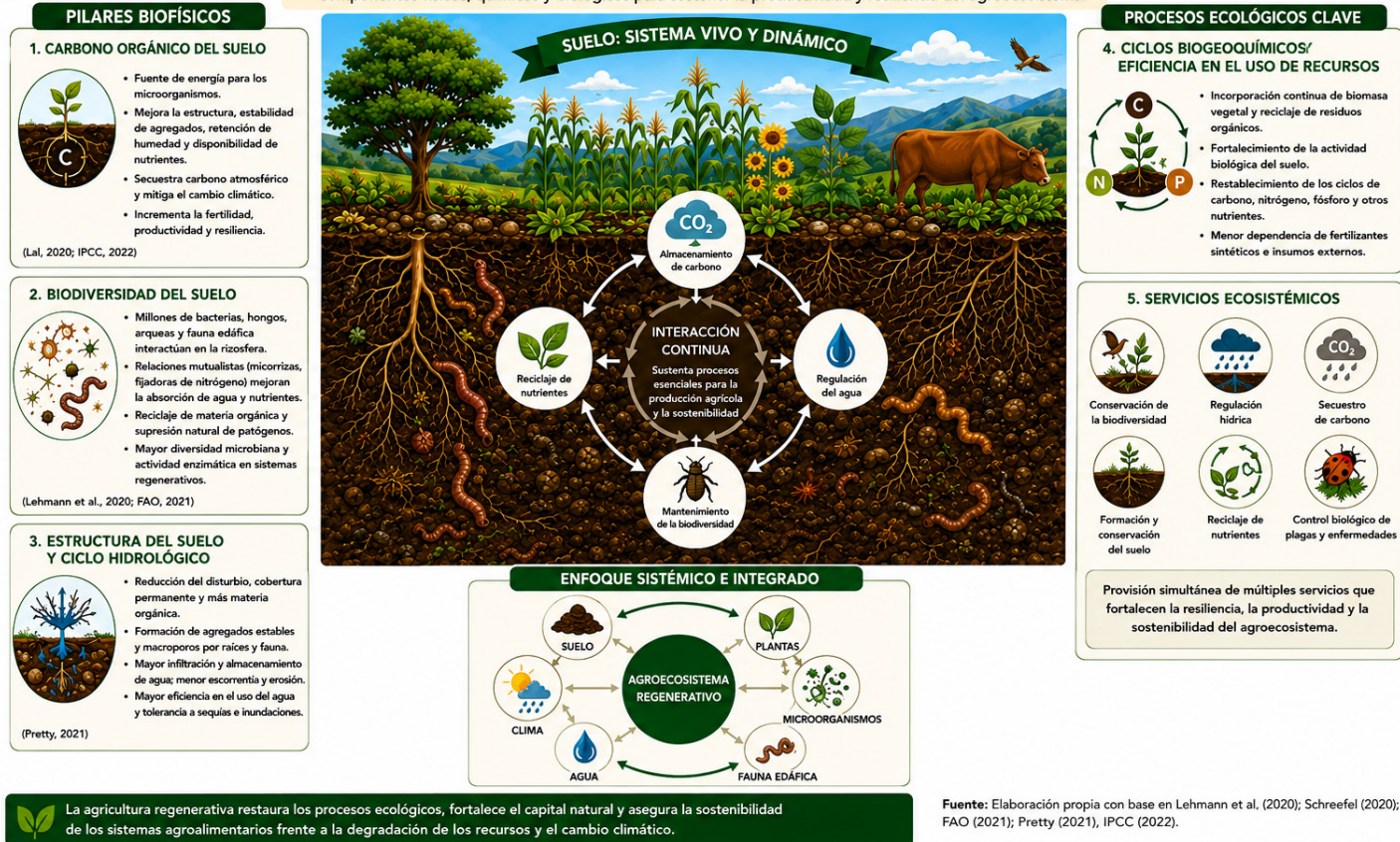
cultivos, particularmente durante periodos de sequía. A su vez, una mayor capacidad de infiltración contribuye a amortiguar los efectos de precipitaciones intensas (Pretty, 2021).

Finalmente, la incorporación de biomasa, el reciclaje de residuos y la actividad biológica favorecen los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y fósforo, mejorando el aprovechamiento de nutrientes y reduciendo potencialmente la dependencia de insumos externos. La interacción de estos procesos genera servicios ecosistémicos como formación y conservación del suelo, regulación hídrica, reciclaje de nutrientes, secuestro de carbono y conservación de la biodiversidad. En conjunto, estos mecanismos contribuyen a recuperar la funcionalidad del agroecosistema y fortalecer su capacidad de adaptación frente a perturbaciones ambientales, constituyendo una base científica para una agricultura más resiliente y ambientalmente responsable (Schreefel et al., 2020).

Figura 2. Bases ecológicas y biofísicas de la agricultura regenerativa.

BASES ECOLÓGICAS Y BIOFÍSICAS DE LA AGRICULTURA REGENERATIVA

Enfoque sistémico que reconoce al suelo como un sistema vivo y dinámico, donde interactúan componentes físicos, químicos y biológicos para sostener la productividad y resiliencia del agroecosistema.



5. SINERGIAS ENTRE LAS PRÁCTICAS REGENERATIVAS

Uno de los elementos que distingue a la agricultura regenerativa de otros enfoques de manejo es que la recuperación del agroecosistema no depende de prácticas aisladas, sino de la interacción funcional entre estrategias complementarias. Las sinergias pueden entenderse como interacciones positivas mediante las cuales la combinación de prácticas genera beneficios que superan los obtenidos individualmente. Por ello, la agricultura regenerativa debe evaluarse como un sistema de manejo en el que diferentes prácticas actúan simultáneamente sobre procesos físicos, químicos y biológicos del suelo y sobre las interacciones entre sus componentes (Schreefel et al., 2020; Giller et al., 2021).

La reducción o eliminación de la labranza, por ejemplo, contribuye a conservar la estructura del suelo y disminuir la perturbación de los agregados; sin embargo, sus efectos pueden ser limitados cuando la superficie permanece desnuda o bajo monocultivo. Al combinarla con cultivos de cobertura, la biomasa vegetal protege el suelo de la erosión, aporta residuos orgánicos y proporciona sustratos para la biota edáfica. Esta interacción favorece la acumulación de carbono orgánico, la estabilidad de los agregados, la infiltración de agua y la actividad microbiana (Lal, 2020; Lehmann et al., 2020). Así, una práctica modifica las condiciones que permiten que otra genere mayores beneficios.

Las rotaciones diversificadas amplifican estos efectos al incorporar especies con diferentes sistemas radicales, tasas de crecimiento y requerimientos nutricionales. Las leguminosas pueden contribuir al suministro de nitrógeno mediante fijación biológica, mientras que las gramíneas aportan cantidades importantes de biomasa y carbono; otras especies pueden explorar diferentes profundidades del suelo y favorecer su estructuración. Cuando estas rotaciones se combinan con cobertura permanente y labranza reducida, se mantiene un flujo más continuo de carbono y nutrientes hacia el suelo y se favorece una comunidad biológica más diversa y funcional. De esta manera, la diversificación puede mejorar el reciclaje de nutrientes y reducir la dependencia de insumos externos.

Los policultivos y las asociaciones de cultivos constituyen otra fuente de complementariedad. La coexistencia de especies con características fisiológicas diferentes puede favorecer un uso más eficiente de la radiación, el agua y los nutrientes, además de incrementar la diversidad estructural del agroecosistema. Esta complejidad proporciona hábitats y recursos para polinizadores, enemigos naturales y microorganismos benéficos, fortaleciendo mecanismos de regulación biológica. Cuando los policultivos

se integran con rotaciones y cobertura del suelo, estos efectos pueden contribuir a una mayor estabilidad frente a perturbaciones ambientales y biológicas.

La agroforestería representa una forma avanzada de integración, al incorporar especies arbóreas dentro de los sistemas agrícolas. Las raíces profundas pueden explorar nutrientes y agua de diferentes horizontes, mientras que la hojarasca aporta materia orgánica y alimenta a los descomponedores. Además, el dosel arbóreo modifica el microclima, reduce la velocidad del viento y puede disminuir la evaporación. La combinación de árboles con cultivos de cobertura y prácticas de conservación puede incrementar el almacenamiento de carbono y favorecer servicios ecosistémicos asociados con la regulación hídrica, la biodiversidad y la adaptación al cambio climático.

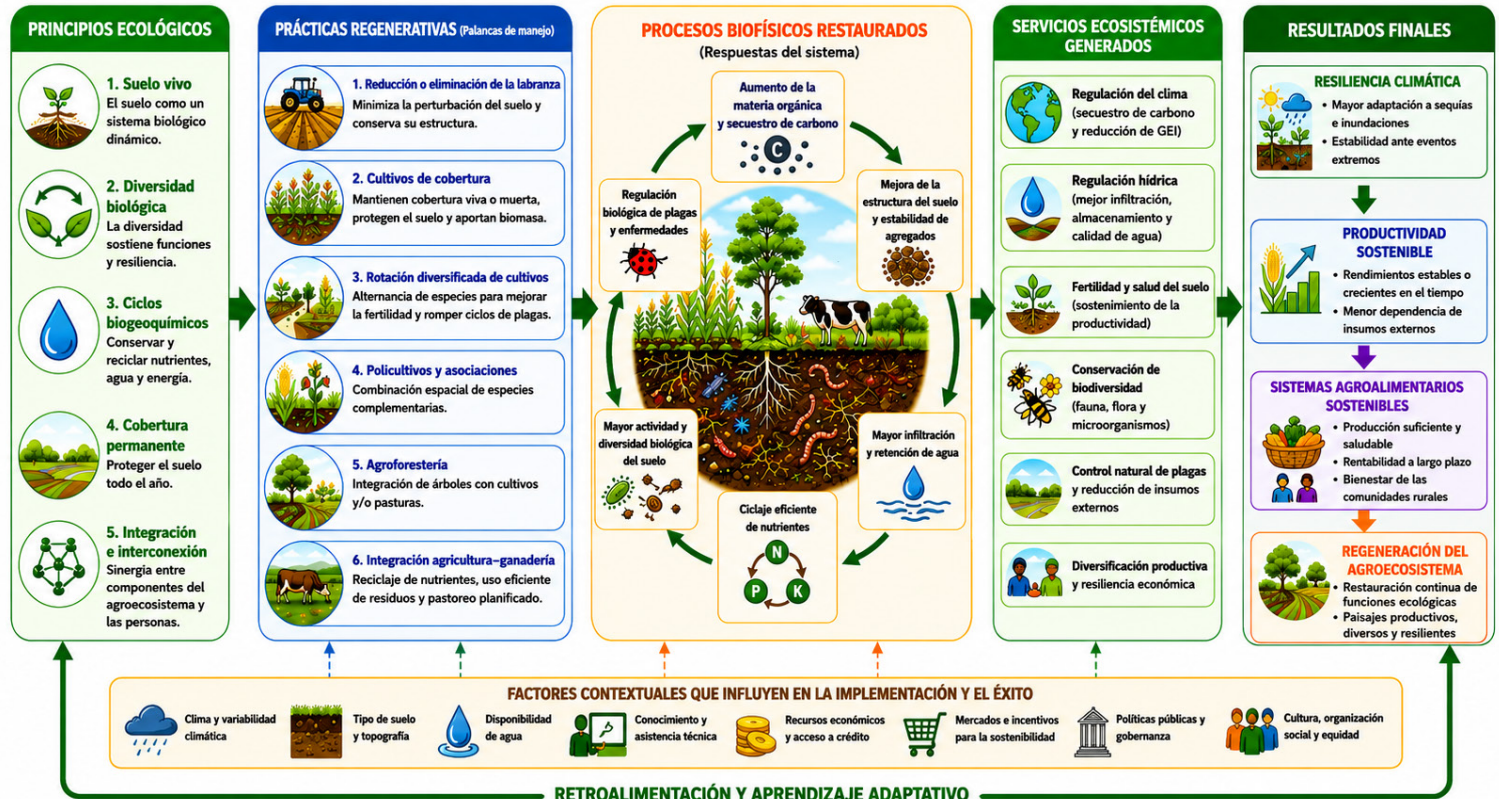
La integración agricultura-ganadería permite, a su vez, cerrar parcialmente los ciclos de nutrientes mediante el aprovechamiento de residuos agrícolas y la reincorporación del estiércol al suelo. El pastoreo planificado puede contribuir a redistribuir materia orgánica y estimular el rebrote vegetal cuando la carga animal y los periodos de descanso se ajustan a la capacidad del sistema. Su integración con árboles origina sistemas silvopastoriles que combinan producción agrícola, pecuaria y forestal y pueden ampliar la provisión de servicios ecosistémicos.

La interacción entre estas prácticas puede traducirse en beneficios simultáneos sobre la estructura del suelo, biodiversidad, regulación hídrica, reciclaje de nutrientes y almacenamiento de carbono. Sin embargo, la magnitud de las sinergias no es universal. Depende del clima, tipo de suelo, disponibilidad de agua, especies utilizadas, historial de manejo y condiciones socioeconómicas. En regiones tropicales, por ejemplo, las altas temperaturas y tasas de descomposición pueden modificar la dinámica del carbono y los nutrientes, por lo que las prácticas deben adaptarse al contexto local. Además, algunos beneficios requieren varios años para consolidarse, haciendo necesaria su evaluación mediante indicadores de largo plazo.

La Figura 3 sintetiza la relación entre cinco principios ecológicos y seis prácticas de manejo de la agricultura regenerativa. Su aplicación integrada favorece la acumulación de materia orgánica, estabilidad del suelo, actividad biológica, reciclaje de nutrientes y regulación hídrica. Estos procesos fortalecen servicios ecosistémicos como fertilidad, biodiversidad, regulación climática y control biológico, contribuyendo a la resiliencia y productividad sostenible. Por ello, la agricultura regenerativa constituye un sistema adaptativo que requiere evaluación y ajuste según las condiciones locales.

Figura 3. Modelo conceptual de la agricultura regenerativa.

Modelo conceptual de la agricultura regenerativa: de principios ecológicos a sistemas agroalimentarios sostenibles



Nota: GEI = gases de efecto invernadero.

Fuente: Elaboración propia con base en Schreefel et al. (2020), Giller et al. (2021), FAO (2021), Lal (2020), Pretty (2021), IPCC (2022) y otros autores citados en el Capítulo III.

6. ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES BENEFICIOS Y RESULTADOS CLAVE DE LA AGRICULTURA REGENERATIVA

6.1. BENEFICIOS ECONÓMICOS

La agricultura regenerativa puede ofrecer beneficios económicos al reducir ciertos costos y mejorar el aprovechamiento de los recursos disponibles. La Figura 4 muestra cómo estas prácticas pueden contribuir al bienestar económico de los agricultores. Algunos estudios han reportado resultados favorables: por ejemplo, se ha señalado que las explotaciones de maíz bajo principios regenerativos en Estados Unidos alcanzaron una rentabilidad aproximadamente 80 % mayor que las convencionales, mientras que en Alemania se registraron incrementos cercanos al 60 %.

Sin embargo, estos resultados deben interpretarse con cautela. La rentabilidad agrícola depende de numerosos factores, como los costos de fertilizantes y otros insumos, los precios de venta, los rendimientos obtenidos, las condiciones ambientales y las características de cada explotación. Por ello, un resultado positivo en una región no necesariamente puede reproducirse en otra.

Uno de los principales argumentos económicos de la agricultura regenerativa es la reducción de la dependencia de insumos externos, especialmente fertilizantes sintéticos y herbicidas. No obstante, la transición también puede requerir inversiones iniciales, cambios en las prácticas de manejo y un periodo de adaptación. Para algunos agricultores, esta etapa representa un riesgo, sobre todo cuando no existen mercados diferenciados, precios preferenciales o certificaciones que compensen el esfuerzo adicional.

En consecuencia, aunque existen indicios alentadores, todavía es necesario contar con mayor evidencia sobre los costos, ingresos y beneficios a largo plazo. Fortalecer la investigación y el diálogo entre agricultores y científicos permitirá identificar qué prácticas regenerativas son realmente rentables y bajo qué condiciones pueden contribuir a una agricultura económicamente sostenible.

6.2. BENEFICIOS AMBIENTALES

La agricultura regenerativa busca producir alimentos mientras se protege y recupera el ambiente. Sus principales beneficios se relacionan con la mejora de la calidad del suelo, el aumento de la biodiversidad, el almacenamiento de carbono y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 4). Estas ventajas pueden favorecer sistemas agrícolas más resistentes frente a problemas como la sequía y, al mismo tiempo, mantener su capacidad productiva.

Prácticas como los cultivos de cobertura, la conservación de los residuos de cosecha y la reducción de la alteración del suelo contribuyen a mejorar el ciclo de nutrientes y agua, así como la actividad biológica y la fertilidad del suelo. En Australia, por ejemplo, estas prácticas se asociaron con mayores reservas de carbono y una mejor dinámica de los nutrientes y el agua. De manera similar, en sistemas de pastoreo ovino de España, el pastoreo rotacional produjo alrededor de 30 % más forraje en primavera y aumentó 3.6 % el almacenamiento de carbono en la capa superficial del suelo en comparación con sistemas convencionales.

Sin embargo, es importante interpretar estos beneficios con cautela. Algunas prácticas consideradas regenerativas también se utilizan en sistemas agrícolas convencionales o en otras formas de agricultura sostenible. Además, no todas las prácticas funcionan de la misma manera en todos los lugares. Las condiciones del suelo, el clima, el cultivo y las características de cada finca pueden modificar sus resultados. Por ello, más que aplicar un conjunto de prácticas de manera uniforme, la agricultura regenerativa debe adaptarse a las condiciones particulares de cada sistema productivo.

6.3. BENEFICIOS SOCIALES

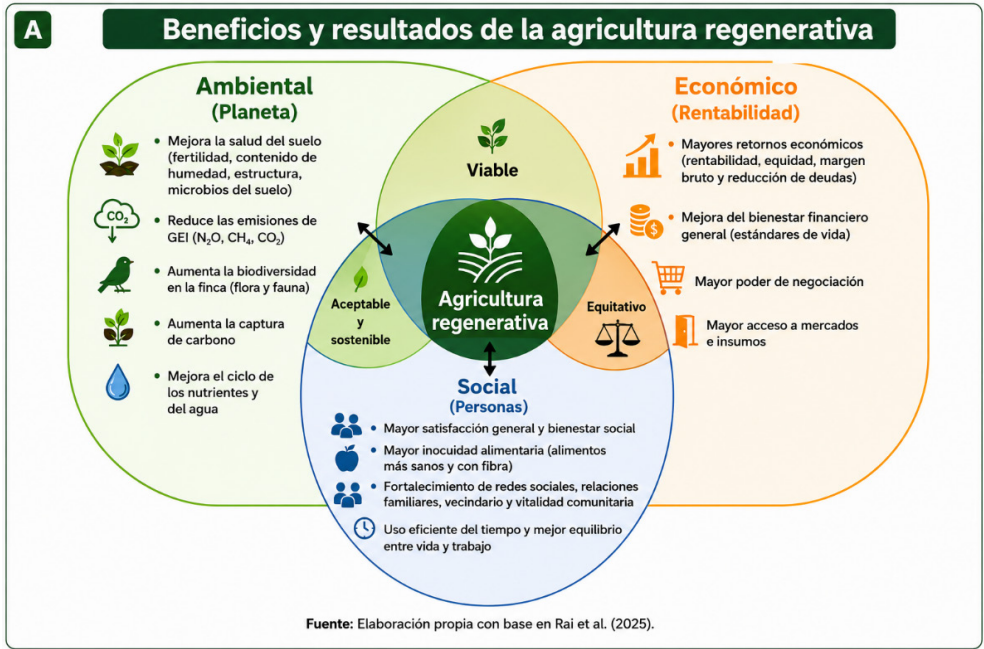
La agricultura regenerativa no solo busca mejorar el suelo y la producción; también pretende favorecer el bienestar de quienes trabajan en el campo (Figura 4). Desde esta perspectiva, la finca se entiende como un sistema vivo en el que interactúan las personas, los cultivos, los animales y la naturaleza. Esta manera de concebir la agricultura puede impulsar una relación más cercana entre los productores y su entorno.

Entre los posibles beneficios sociales se encuentran una mejor calidad de vida, mayor equilibrio entre el trabajo y la vida familiar, fortalecimiento de las relaciones comunitarias y una mayor atención al bienestar de los animales. Algunos agricultores que adoptan este enfoque señalan que dedican más tiempo a observar sus cultivos, reconocer las necesidades de la finca y tomar decisiones de acuerdo con sus objetivos personales y productivos. También puede existir una menor exposición a agroquímicos, especialmente cuando se reducen o sustituyen determinados productos sintéticos. Esto puede representar una ventaja para pequeños productores, aunque su manejo seguro depende siempre de la capacitación y de las condiciones particulares de cada sistema.

Sin embargo, estos beneficios deben interpretarse con prudencia. La satisfacción personal y el bienestar no dependen exclusivamente de la agricultura regenerativa, sino también de factores económicos, familiares y comunitarios. Además, algunos estudios han encontrado incertidumbre sobre los resultados económicos y ambientales de la

transición hacia este modelo. Por ello, todavía es necesario comprender mejor cómo interactúan las dimensiones social, económica y ambiental. En última instancia, el valor social de la agricultura regenerativa dependerá de su capacidad para mejorar tanto la salud del agroecosistema como las condiciones de vida de las personas que lo sostienen.

Figura 4. Beneficios y resultados de la agricultura regenerativa.



7. CONCLUSIÓN

La agricultura regenerativa propone una forma diferente de relacionarnos con el suelo: en lugar de considerarlo únicamente como un soporte para los cultivos, lo entiende como un ecosistema vivo que puede recuperarse mediante el manejo adecuado. Sus principios buscan conservar la diversidad, mantener el suelo cubierto, favorecer el reciclaje de nutrientes y fortalecer las relaciones entre plantas, organismos, animales y personas. Las figuras y esquemas ayudan a visualizar algo que no siempre es fácil de comprender mediante palabras: en un agroecosistema, todo está relacionado. Las plantas interactúan con el suelo, los microorganismos, el agua y los nutrientes, y estas relaciones influyen en la productividad y en la capacidad del sistema para enfrentar los cambios ambientales. Por ello, los esquemas no solo complementan el texto, sino que facilitan al lector comprender cómo las diferentes prácticas regenerativas pueden trabajar juntas para recuperar el suelo y fortalecer el agroecosistema.

REFERENCIAS

Beacham, J. D., Jackson, P., Jaworski, C. C., Krzywoszynska, A., & Dicks, L. V. (2023). Contextualising farmer perspectives on regenerative agriculture: A post-productivist future? *Journal of Rural Studies*, 102, 103100. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103100>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Systems at breaking point*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A., & Sumberg, J. (2021). Regenerative agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*, 50(1), 13–25. <https://doi.org/10.1177/0030727021998063>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>

Lal, R. (2020). Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(5), 123A–124A. <https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A>

Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>

Mambo, T., & Lhermie, G. (2024). The futures for regenerative agriculture: Insights from the organic movement and the tussle with industrial agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1455024. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1455024>

Nasukawa, H., Tajima, R., Pereira, M. C. F., Pedro, J. A., Nakamura, S., Fukuda, M., ... Homma, K. (2025). Management strategies for regenerative agriculture based on the assessment of soil fertility in northern Mozambique. *Geoderma Regional*, 40, e00912. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00912>

Newton, P., Civita, N., Frankel-Goldwater, L., Bartel, K., & Johns, C. (2020). What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 577723. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.577723>

Pretty, J. (2018). Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Science*, 362(6417), eaav0294. <https://doi.org/10.1126/science.aav0294>

Rhodes, C. J. (2017). The imperative for regenerative agriculture. *Science Progress*, 100(1), 80–129. <https://doi.org/10.3184/003685017X14876775256165>

Roberts, J. M., Gatehouse, A. M. R., & Bruce, T. J. A. (2026). A new sustainability paradigm beyond the organic brand. *Trends in Plant Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2026.07.011>

Sánchez-García, P. (2022). *Agricultura regenerativa* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=H8DPsKpB-kA>

Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P., & van Zanten, H. H. E. (2020). Regenerative agriculture—The soil is the base. *Global Food Security*, 26, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>

CAPÍTULO 5

FUNCTIONAL ROLE OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN AGGREGATE FORMATION, BIODIVERSITY, AND EDAPHIC FUNCTIONING

Data de submissão: 21/08/2026

Data de aceite: 10/09/2026

Sud Sair Sierra

Zenkinoko SAS, Diag 151 B

No. 136 A-75 House 93

Universidad de Bogotá

Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 # 22-61

Bogotá – Cundinamarca – Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-8816-5787>

Raúl Hernando Posada

Zenkinoko SAS, Diag 151 B

No. 136 A-75 House 93

Bogotá – Cundinamarca – Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-4806-6215>

Johanna Santamaría

Universidad de Bogotá

Jorge Tadeo Lozano, Carrera 4 # 22-61

Bogotá – Cundinamarca – Colombia

<https://orcid.org/0000-0001-5345-6683>

ABSTRACT: The relationships between arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and other microorganisms, and how these microorganisms contribute to aggregate formation and stability, are not yet fully understood. Therefore, the objective of this review is to provide an up-to-date overview of the state of the art regarding AMF and their

functionality, using an updated systematic review as the methodology. The research addresses two main questions: 1) What is the functional role of AMF in aggregate formation and stability? and 2) What is the influence of AMF on soil diversity? Arbuscular mycorrhizal fungi play a fundamental role in maintaining soil ecosystem functionality by promoting aggregate formation, enhancing soil biodiversity, and regulating key ecological processes involved in nutrient cycling, carbon sequestration, and ecosystem resilience. Through their extensive interactions with plants, microorganisms, and soil fauna, AMF act as ecosystem engineers that contribute significantly to soil sustainability and the long-term provision of ecosystem services, supporting ecosystem stability, productivity, and adaptation to environmental change.

KEYWORDS: soil biodiversity; hyphae; soil degradation; ecosystem engineers; aggregation.

PAPEL FUNCIONAL DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN LA FORMACIÓN DE AGREGADOS, BIODIVERSIDAD Y FUNCIONAMIENTO EDÁFICO

RESUMEN: Las relaciones entre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y otros microorganismos, así como la forma en que estos microorganismos contribuyen a la formación y estabilidad de los agregados, aún

no se comprenden del todo. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es ofrecer una visión general actualizada del estado de la cuestión en relación con los HMA y su funcionalidad, utilizando como metodología una revisión sistemática actualizada. La investigación aborda dos preguntas principales: 1) ¿Cuál es el papel funcional de los HMA en la formación y estabilidad de los agregados? y 2) ¿Cuál es la influencia de los HMA en la diversidad del suelo? Los hongos micorrízicos arbusculares desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de la funcionalidad del ecosistema del suelo al promover la formación de agregados, potenciar la biodiversidad del suelo y regular procesos ecológicos clave relacionados con el ciclo de los nutrientes, el secuestro de carbono y la resiliencia del ecosistema. A través de sus amplias interacciones con las plantas, los microorganismos y la fauna del suelo, los HMA actúan como «ingenieros del ecosistema» que contribuyen de manera significativa a la sostenibilidad del suelo y a la prestación a largo plazo de los servicios ecosistémicos, favoreciendo la estabilidad, la productividad y la adaptación del ecosistema al cambio medioambiental.

PALABRAS CLAVE: biodiversidad del suelo; hifas; degradación del suelo; ingenieros del ecosistema; agregación.

1. INTRODUCTION

Soil is a vital resource for the development of ecosystems and human societies. It constitutes the foundation of agricultural production, supports livelihoods, and accounts for approximately 95% of global food production. Likewise, it provides ecosystem services including biomass production, soil contaminants filtration, plant nutrition, and the regulation of nutrient cycling (Gomiero, 2016; Hu et al., 2023; Tahat et al., 2020). In this context, it is important to highlight that soil properties are affected by both anthropogenic activities and natural events such as droughts and floods, which significantly impact natural processes in the terrestrial ecosystems, causing a global concern about soil health (Chen et al., 2002; Keesstra et al., 2016; Wang et al., 2023). These disruptions can alter the structure and abundance of soil biological communities, negatively influencing their biological and functional diversity; consequently, fundamental ecosystem processes are altered, as edaphic biota play a key role in maintaining soil functions and ecosystem stability (Postma-Blaauw et al., 2010).

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are mutualistic root symbionts whose associations are influenced by the functional characteristics established by both organisms. At the same time, their codependent relationship is shaped by environmental conditions and by the biological traits of the interacting species (Davison et al., 2020; Kokkoris et al., 2020). It is widely recognized that, through this association, fungi acquire carbon compounds from their host plants and, in return, provide access to soil nutrients that are often limited, such as N, P, Fe, and S (Almario et al., 2022). Converting this

association into a particularly important key to natural nutrient cycles, as well as to soil health and productivity (Fall et al., 2022; Huey et al., 2020).

The presence of these fungi in soil has a notable positive effect on soil diversity, as they produce exudates that play an important role in recruiting bacteria, actinomycetes, and other fungi (Barea et al., 2005; L. Zhang et al., 2022). Likewise, AMF are fundamental to soil multifunctionality, contributing to key processes such as primary production, nutrient cycling, and water and climate regulation across multiple spatial scales: the roots-soil microscale (aggregates formation, carbon transfer, and the creation of micro-habitats); the ecosystemic scale (biomass production increase), and the global scale (reduction of atmospheric CO₂ via its sequestration in soil). In addition to their contributions to disease control, soil and plant health, and the soil microbiome, AMF contribute significantly to the functioning of ecosystem services (Wang & Rengel, 2024).

Many studies have focused on evaluating AMF symbiosis and its function as biofertilizers, limiting themselves to selecting and evaluating the most adaptable morphotypes for agricultural use (Ahammed & Hajiboland, 2024; Azizi et al., 2021; de los Santos-Villalobos & Parra-Cota, 2021; Mahmud & Chong, 2021). Commercially, AMF inoculants are formulated using well-studied AMF species that possess a broad host range and are adapted to a wide variety of soil and environmental conditions (Giovannini et al., 2020).

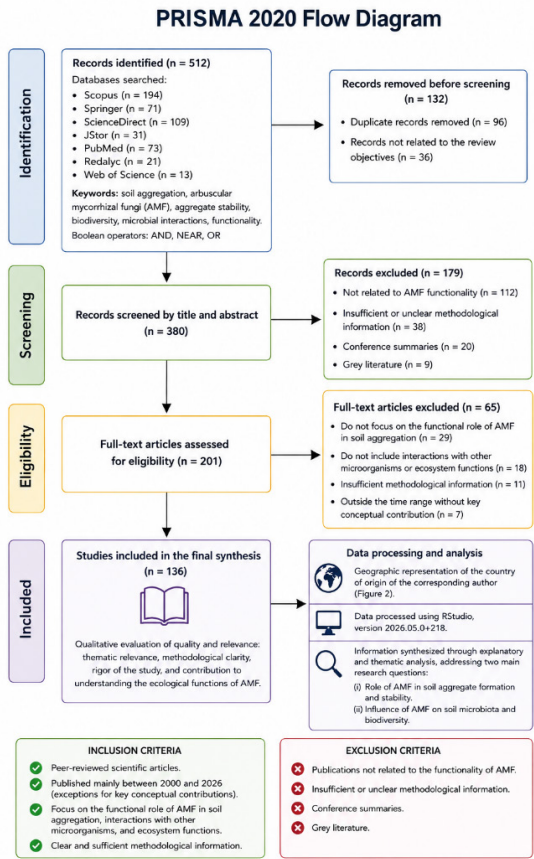
This review focuses on the functional diversity of AMF, addressing biological, physiological, and ecological traits that underline their contributions to plant development, nutrient cycling, and soil ecosystem processes (Rillig & Mummey, 2006). Likewise, their relationships with other soil microorganisms are examined in depth, with which they develop complex interactions that provide a wide range of benefits to plants and soil (Jiang et al., 2020; Netherway et al., 2021). It also describes how the functional diversity of arbuscular mycorrhizal fungi contributes not only to soil fertility but also to the formation and stability of soil aggregates, and how they influence soil diversity.

2. METHODS

The selection of literature was based on a structured review process following the PRISMA 2020 guidelines Fig. 1. Initially, 512 records were identified through searches in Scopus, Springer, ScienceDirect, JStor, PubMed, Redalyc and Web of Science, using keywords such as soil aggregation, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), aggregate stability, biodiversity, microbial interactions and functionality. The searches combined the terms soil aggregation and AMF with other keywords using Boolean operators such as

AND, NEAR, and OR. During the initial screening stage, duplicate records and studies not directly related to the review's objectives were excluded. Among the criteria for including peer-reviewed scientific articles was a publication date between 2000 and 2026. Exceptions were made for articles that contained key concepts, in which case the author who originally defined the concept was cited. The publication's focus had to address the functional role of AMF in soil aggregation, their interactions with other microorganisms, and the key ecosystem functions AMF perform in soil.

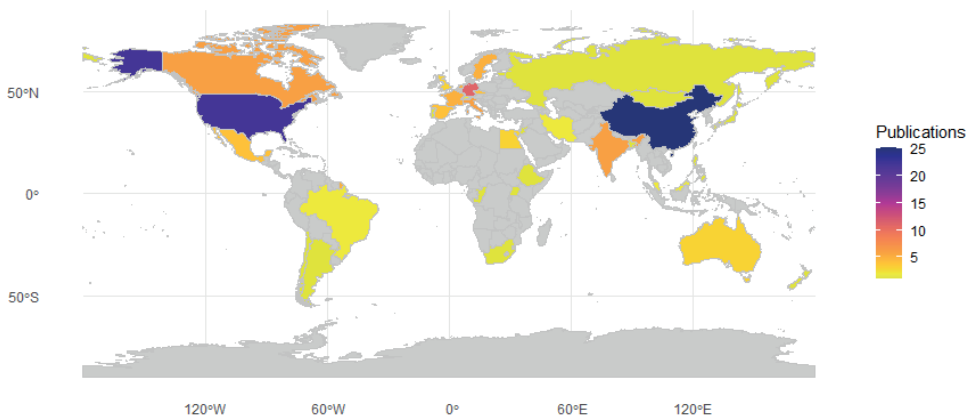
Figure 1. PRISMA 2020 Diagram. PRISMA methodology for the identification of scientific articles in the systematic review, including criteria for selecting and analyzing scientific literature through a checklist and flow diagrams.



Among the exclusion criteria included publications that were not directly related to the functionality of AMF, those that did not provide sufficiently clear methodological information, likewise scientific conference abstracts and grey literature. The country of origin of the lead author of each reviewed article was represented cartographically Fig. 2. The data were processed using RStudio software, version 2026.05.0+218. After reviewing

titles, abstracts, and full texts, 136 articles were selected for the final synthesis. The quality and suitability of the publications were assessed qualitatively based on thematic relevance, clarity of the methodology described, study rigor, and their contribution to understanding the ecological functions of AMF. Selected information was synthesised through an explanatory and thematic analysis, in which the evidence was grouped around two main research questions: (i) the role of AMF in the formation and stability of soil aggregates and (ii) the influence of AMF on soil microbiota and biodiversity.

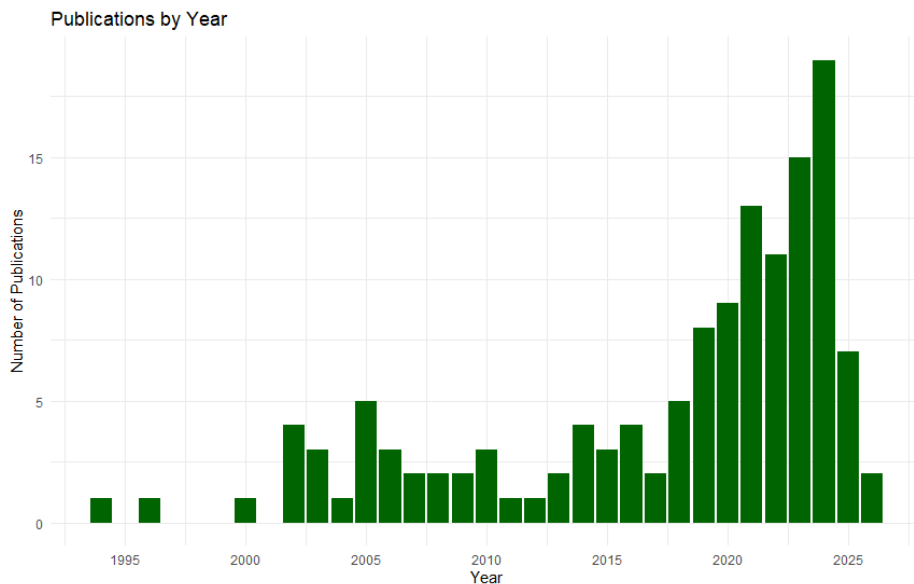
Figure 2. Geographical distribution of publications by the country of the lead author. China and the United States of America had the highest number of publications.



3. RESULTS

The literature review identified 385 documents; of these, 136 papers were selected for inclusion. The publication years are presented in Fig. 3. A total of 2.2% (3 articles) were published before 2000, while 16.9% of the reviewed publications (23 articles) were published from 2000 to 2009. For the decade spanning 2010–2019, the percentage of publications was 24.3% (33 articles), whereas 56.6% (77 articles) corresponded to the period 2020–2025. Special attention was given to the 110 most recent publications (published between 2010 and 2026) to address the objectives of this review. The publications covered a wide range of topics, including the role of AMF in aggregate formation, interactions between AMF and other microorganisms, and the effects of soil disturbance and degradation on AMF.

Figure 3. Number of scientific publications per year related to the objective of this research. An increasing trend in publications was observed, with a higher peak in 2021.



The contribution of the AMF to aggregate formation and stability is under development taking the following question into account:

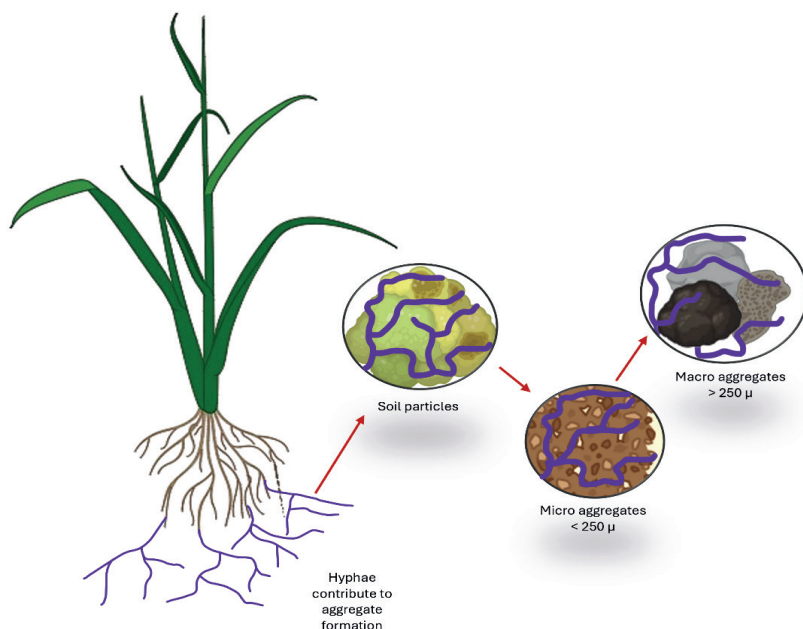
I) The role of AMF in the formation and stability of soil aggregates?

Soil structure, defined as the arrangement or grouping of mineral and organic soil particles into units known as aggregates (Woldemar, 1907), is a crucial characteristic for maintaining soil porosity, gas exchange, water infiltration, erosion resistance, and carbon sequestration (Borie et al., 2008; Guo et al., 2019). This soil characteristic is directly altered by natural and anthropogenic activities such as rainfall regimes, conventional agriculture and deforestation, which directly or indirectly impact its properties, thereby influencing the biotic and abiotic components that regulate soil stability (Barto et al., 2010).

Soil aggregation constitutes a fundamental dynamic component of soil structure formation and stabilization, contributing to the conservation of its physical, chemical and biological properties (Yudina & Kuzyakov, 2023). It is often treated as a static phenomenon, but it is a dynamic cycle in which aggregates are continuously formed and degraded over timescales that can be as short as a few weeks (Morris et al., 2019). Aggregates are an important factor in C sequestration, since the C cycle in soil regulates the quantity and quality of C retained in its principal fractions: humic acid (HA), fulvic acid (FA), and humin, according to their solubility in alkaline and acid solutions (Olk et al., 2019).

The incorporation of carbon into aggregates allows it to remain protected, preventing its rapid release as CO₂ into the atmosphere (Rabbi et al., 2016). The aggregation process is influenced by both abiotic factors, such as rainfall regimes (Spohn & Giani, 2011), and biotic components, such as fungi and bacteria (Lehmann et al., 2017; Lehmann & Rillig, 2015; Morris et al., 2019).

Figure 4. Arbuscular mycorrhizal fungi contribution to the formation, increase in size and stability of soil aggregates. Violet or purple color corresponds to the AMF hyphae.



AMF are among the key actors in the rhizosphere, principally in processes such as the formation and stability of soil aggregates Fig. 4. Their hyphae are one of their most important traits, because they extend to establish networks that are closely associated with the production of glomalin-related soil proteins (GRSP) and interact with soil particles (Zhao et al., 2024). According to Alptekin et al., (2025) this compound is a complex carbohydrate of fungal origin, possibly produced by the cell walls of arbuscular mycorrhizal fungi hyphae, and it plays an important role in soil aggregation and stability by functioning as a cementing agent for soil particles. Recent studies have shown that different AMF taxa differ in extraradical mycelial growth, the GRSP production, and interactions with other soil microorganisms, generating diverse responses in aggregate stability and associated ecosystem processes (Morris et al., 2019; Rillig & Mummey, 2006; Son et al., 2024; Wang & Feng, 2021). GRSP have been studied for their contribution to reducing soil degradation, as they are directly associated with physicochemical parameters such as

structural stability, carbon sequestration, water retention, and nutrient cycling (Nagy et al., 2026; Zhou et al., 2024).

Nevertheless, recent advances in the molecular characterization of glomalin have raised questions about its true biochemical identity, challenging the traditional hypothesis that it is a protein produced by AMF and suggesting it may be a predominantly carbohydrate-based compound. In this context, Alptekin et al., (2025), in their research *“From glomalin to glomalose: unravelling the molecular identity of the MAb32B11 antigen”*, indicate that the RiHSP60 protein does not fully explain the nature of glomalin, as it is part of the fungal domain and is not specific to AMF.

Additionally, the authors indicate that this hypothesis lacks experimental support because the MAb32B11 antigen does not recognize the RiHSP60 polypeptide as a protein. Based on their results, the authors propose that the MAb32B11 antigen is associated with a protein-free fraction with higher carbohydrate content, which they term “glomalose”. This molecule is a high-molecular-weight polysaccharide with a size range of 500 to 600 kilodaltons (kDa).

The involvement of AMF in aggregate formation includes: a) biophysical mechanisms, through the direct interaction of hyphae with soil particles (Ji et al., 2024). b) biochemical mechanisms, especially associated with the production of glycoproteins, hydrophobins, and polysaccharides (Li et al., 2023). Finally, c) biological mechanisms, which are its development through AMF interactions with host plants and other soil microorganisms (Gómez-Leyva et al., 2023; Lu et al., 2023).

AMF contributes to aggregate formation through biophysical mechanisms by promoting the growth of extraradical mycelium, which forms an extensive physical network linking particles and microaggregates (Jiménez-Martínez et al., 2024; Richter et al., 2024). Hyphal networks act as physical bridges connecting soil particles and microaggregates, facilitating the movement of water, nutrients, and microorganisms (Faghihinia et al., 2024; Pauwels et al., 2023). Likewise, the extent, thickness, and architecture of hyphae contribute substantially to the mechanical resistance of aggregates against erosion and water degradation (Ji et al., 2024). Through the growth and expansion of these networks, mechanical pressure is generated, bringing soil particles and microaggregates closer together and compacting them, leading to the formation of stable macroaggregates and contributing to pores distribution (Jiménez-Martínez et al., 2024; Richter et al., 2024). Additionally, mycorrhizal networks can connect the roots of different plants via shared hyphae, functioning as a communication network among diverse plants (Luo et al., 2023). Due to their filamentous growth and extensive mycelial networks, AMF can extend beyond

the nutrient-depletion zone of the rhizosphere in search of nutrients, reaching distances of up to 14 linear centimeters (Jansa et al., 2003). They also account for 30% of the soil microbial biomass (Kakouridis et al., 2024).

Regarding biochemical mechanisms, studies such as those by Borie et al., (2008); Costa et al., (2018); Lehmann, Zheng, et al., (2017); Morris et al., (2019); Rillig & Mummey, (2006) and Wilkes et al., (2021) indicate that AMF plays an active role in aggregate formation by producing extracellular compounds that act as cementing agents. These exudates enhance adhesion between soil particles and organic matter, creating viscous films around hyphae and roots that contribute to the formation and stability of microaggregates (Agnihotri et al., 2022; Huang et al., 2022; Lanfranco et al., 2016; Řezáčová et al., 2021; Rodriguez-Garcia & Müller, 2026). Additionally, AMF contributes to the stabilization of organic carbon by producing recalcitrant biochemical compounds that protect organic matter within aggregates, reducing rapid decomposition and contributing to the long-term structural integrity of soil (Qin et al., 2023; Tao & Liu, 2024).

AMF contribute to aggregate formation through biological mechanisms by stimulating the growth of bacterial and fungal communities in the mycorrhizosphere, with which they complement processes such as nutrient cycling, carbon sequestration, and aggregate formation (Emmett et al., 2021; Philippot et al., 2024; Yuan et al., 2021; L. Zhang et al., 2022). Their main contribution lies in the creation of microhabitats where associated microorganisms proliferate and contribute to the production of cementing compounds, biofilms, and metabolites that strengthen soil particle cohesion, thereby promoting aggregate formation (Wilpiseski et al., 2019). Additionally, hyphal necromass is a major source of soil carbon and serves as a substrate for bacterial community development (Liu et al., 2023; Zhou et al., 2024).

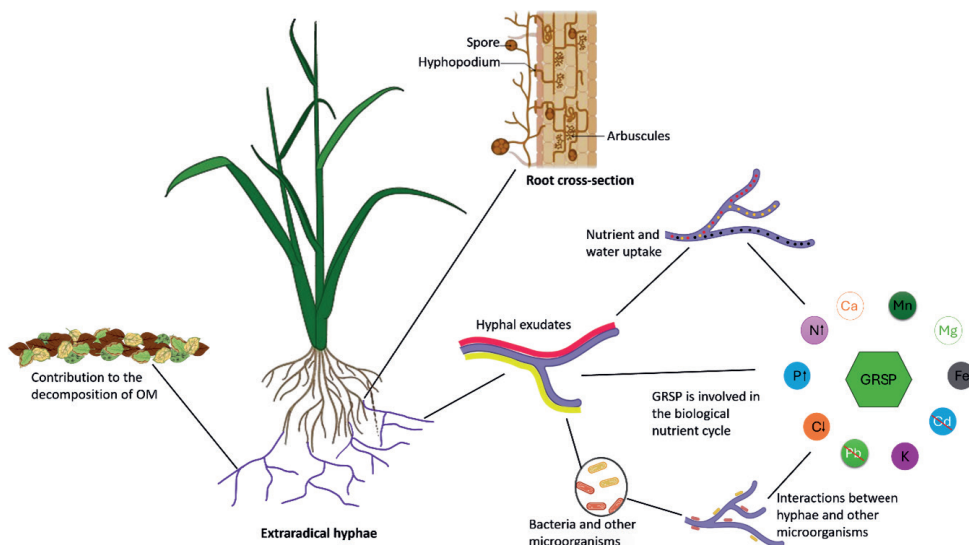
It is important to clarify that the relative contribution of each mechanism can vary considerably across ecosystems or agricultural systems, and that factors such as AMF community structure, the associated microbiome, soil physicochemical characteristics, and environmental disturbance or agronomic management practices must be considered. The community of AMF species present in the soil is related to its aggregation capacity, as different morphotypes can produce hyphae with distinct traits (Klironomos & Hart, 2002; Lehmann, et al., 2017). Studies such as those by Enkhtuya & Vosátka, (2005); Klironomos et al., (2005); Lehmann, et al., (2017) and Piotrowski et al., (2004) provide evidence of differences in soil aggregation capacity among AMF morphotypes, highlighting that the combination of fungal species and host plants is crucial for determining the direction and intensity of the relationship along the mutualism–parasitism continuum.

AMF do not act independently in soil; they develop relationships with a diverse range of microorganisms that influence the formation and maintenance of soil aggregates. This aspect will be further addressed in the second research question, which aims to emphasize the significant role of AMF in soil biodiversity and their positive impact on aggregate formation.

II) What is the influence of AMF on soil biodiversity?

According to Barea et al., (2005), soil biodiversity encompasses a wide range of essential interactions that maintain ecosystem balance and support the productivity of agricultural and natural systems. These microbial interactions are more complex in the rhizosphere and mycorrhizosphere (Wang & Feng, 2021), a dynamic niche that enables complex symbiotic and synergistic relationships among AMF, host plant roots, and the diverse community of soil microorganisms. Fig. 5 illustrates some of the interactions that occur within the mycorrhizosphere.

Figure 5. Main functions of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil. Nutrient uptake, interactions with soil microorganisms, heavy-metal immobilization, and nutrient transfer to the plant.



Among the most extensively studied interactions within the mycorrhizosphere are those between AMF and bacteria, known as mycorrhiza helper bacteria (MHB) (Garbaye, 1994). Bacteria belonging to the genera *Bacillus* and *Pseudomonas* play a key role in AMF spore germination (Roesti et al., 2005; Sangwan & Prasanna, 2022; Turrini et al., 2018). Furthermore, bacteria belonging to the genera *Paenibacillus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Burkholderia*, and *Streptomyces* can influence hyphal growth (Aspray et al., 2013; Frey-

Klett & Garbaye, 2005), and the establishment of the symbiosis (Nasslahsen et al., 2022; Rigamonte et al., 2010). Table 1 presents several reported cases of bacteria that interact directly with AMF and their effects on the plant-AMF symbiotic association.

Table 1. Literature documenting the types of interactions between AMF and bacteria.

Bacteria	Type of interaction with AMF	Effect in the relation AMF/ Bacteria	Scientific reference
<i>Pseudomonas spp.</i>	Association with spores and roots.	They stimulate spore germination, hyphal growth, and root colonization.	Bharadwaj et al., (2008); Frey-Klett et al., (2007); Xavier & Germida, (2003)
<i>Azospirillum spp.</i>	N fixation and association in the rhizosphere.	Increase in nutrient absorption (N, P, K, etc.).	Bernados et al., (2024)
<i>Stenotrophomonas spp.</i>	Production of phytohormones and enzymes.	They stimulate hyphal growth, improve the establishment of symbiosis, and improve protection against pathogens.	Bharadwaj et al., (2008)
<i>Burkholderia spp.</i>	Association in the mycorrhizosphere.	They stimulate bacterial proliferation, promote root colonization, and enhance mycelial activity.	Akyol et al., (2019)
<i>Rhizobium spp.</i>	Multiple symbiosis with legumes.	Synergy between N fixation and mycorrhization increases the absorption of soluble P.	Artursson et al., (2006)
<i>Streptomyces spp.</i>	Production of antibiotics and bioactive compounds.	They stimulate the spore germination and protect the mycelium against pathogens.	Agnolucci et al., (2019); Pandit et al., (2022)
<i>Paenibacillus spp.</i>	Accelerate hyphal growth.	They induce hyphal branching and improve the mycorrhiza formation.	Frey-Klett et al., (2007); Rigamonte et al., (2010)
<i>Cellulomonas spp.</i>	Associated with the rhizosphere of mycorrhizal plants.	They increase nutrient availability and promote mycelial development.	Akyol et al., (2019)
<i>Microbacterium spp.</i>	They colonize roots and the mycorrhizosphere.	They stimulate AMF colonization and the production of beneficial metabolites.	(Akyol et al., 2019)

The table summarizes bibliographic evidence on the types of interactions between bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi, including mechanisms, effects, and references.

These associations promote root colonization and stimulate plant growth, confirming the concept of mycorrhiza as a tripartite association, and framing the symbiosis as a multiscale interaction in which bacterial microorganisms are co-protagonists (Bonfante & Anca, 2009). Likewise, Wang et al., (2022) confirmed that compounds released by AMF hyphae can influence soil pH and aggregation, thereby impacting microbial composition, nutrient availability, and water distribution. In their research, Akyol et al., (2019) demonstrated that AMF inoculation in agricultural soils alters the native microbial community and enriches bacterial genera such as *Burkholderia*, *Cellulomonas*, *Microbacterium*, and *Streptomyces*, which can enhance colonization and functioning of the mycelium.

Furthermore, Barea et al., (2002) determined that the mycorrhizosphere of AMF creates a microenvironment where beneficial bacteria act as biocontrol agents, reducing the incidence of phytopathogens and increasing plant tolerance to water and nutrient stress. Additionally, AMF can modify how water affects bacterial communities, leading to changes in plant physiological responses, such as the exudation of organic compounds by roots (Vivas et al., 2003). They also induce changes in the concentrations of plant hormones such as abscisic and jasmonic acids, which serve as signaling molecules that activate induced systemic resistance (ISR), thereby triggering defenses against pathogens and under stress conditions (Ruiz-Lozano et al., 2012). These changes indirectly alter the mycorrhizosphere habitat, potentially promoting the homogenization and loss of bacterial diversity, ultimately modifying multi-kingdom interactions (Debray et al., 2022; Werner et al., 2014). Therefore, AMF act as key determinants of soil microbial community reorganization through plant-mediated mechanisms, highlighting their role in regulating functions in the mycorrhizosphere under stress conditions.

Also, Ansari et al., (2024) indicated that plant growth-promoting bacteria (PGPB) and AMF work together to stimulate acquired systemic immunity and induce resistance, increasing the production of antimicrobial metabolites, promoting competition for nutrients, and modulating hormones, thereby improving plant resistance to pathogens and abiotic stresses. Additionally, AMF act as organizers of soil biodiversity structure and dynamics, functioning as regulators in soil ecological interactions (Yang et al., 2024). These interactions arise from the formation of hyphal networks that enhance the plant's nutrient and water uptake and create microhabitats that support the growth of bacteria and other fungi (Wang et al., 2024; Zhang et al., 2022). AMF also promote soil biological diversity through the exudation of organic compounds and the release of glomalin, which fosters heterogeneous environments rich in ecological niches for microorganisms and soil

mesofauna (Rillig et al., 2015). The presence of HMA increases the structural diversity of the edaphic habitat, allowing colonization by specialized bacterial communities, including PGPR and MHB (Frey-Klett et al., 2007).

Among AMF's relationships with other microorganisms, the relationship with dark septate fungi (DSF) was also reviewed. DSF is a polyphyletic group of endophytic fungi with melanized cell walls and septa. These fungi cohabit with AMF in the roots of many plants, in both natural and disturbed soils, and both groups can colonize roots simultaneously, forming composite fungal communities (García-Mares et al., 2024; Lugo et al., 2018; Xie et al., 2021). The relationships that develop among these microorganisms are either neutral or synergistic, as observed in cases (Chaudhry et al., 2009; Wang et al., 2024) where the DSF and AMF coexist without apparent antagonism, and in some cases, coinoculation results in additive and synergistic effects on the plant. Researchers such as Bueno de Mesquita et al., (2018) and Gong et al., (2023) have reported competition for niches, space in roots, or resources, which leads to changes in colonization patterns depending on the plant species, fungal species, and soil conditions.

Similarly, plants colonized by AMF can significantly alter their physiological responses to viral infections, often decreasing symptom severity (Ebrahimi et al., 2020; Maffei et al., 2014). The interaction between AMF and plants can induce changes in the expression of defense-related genes, mainly those involved in the synthesis of phenolic and flavonoid compounds, which are essential to the antiviral response (Aseel et al., 2019, 2025; Rashad et al., 2023; Zhang et al., 2013).

On the other hand, soil meso-organisms, such as insects and other mycophagous taxa, play an important role in the ecological dynamics of AMF. Many edaphic arthropods feed on mycorrhizal hyphae, thereby moderating fungal biomass and affecting the capacity for root colonization (Klironomos & Kendrick, 1996). Although mycophagy may decrease symbiotic efficiency, it also allows ecological feedback by breaking hyphae, redistributing propagules in the soil, and increasing the production of biochemical compounds that stimulate other microbial communities (Wardle, 2006). Thus, mycophagous organisms are indirectly involved in AMF activities and in their multi-kingdom interactions in the rhizosphere.

Additionally, larger animals, such as birds and rodents, are also involved in AMF dynamics by dispersing spores (Mangan & Adler, 2000). The AMF dispersal can occur through the accidental ingestion of propagules from roots, soil, or plant material, which are then excreted by animals, providing a safe pathway for the long-distance transport of these organisms (Correia et al., 2019; Stephens et al., 2021). This animal-mediated

dispersal (endozoochory and epizoochory) favors the persistence of mycorrhizal symbiosis in fragmented, disturbed, and/or eroded ecosystems, thereby contributing to preserving functional diversity in plant and microbial communities (Paz et al., 2021; Zaharick et al., 2015). Finally, evidence shows that AMF are dispersed through multiple vectors, both biotic (by animals, including humans; Elliott et al., (2022); Mangan & Adler, (2000)), and abiotic (by water or air/wind; Chaudhary et al., (2020)), which helps explain why their presence and colonization do not rely solely on interactions with microbiota and microfauna underground.

Finally, AMF is among the microorganisms that contribute to soil functionality. However, it should be emphasized that symbiosis is driven by multiple ecological factors, including the AMF species or families involved, the host plant's mycorrhizal dependency, as well as edaphic and climatic conditions, and soil management practices (Enebe & Erasmus, 2023). The contribution of AMF to soil functionality cannot be generalized, as different species or families exhibit distinct ecological traits. As mentioned by Janoušková et al., (2023), AMF respond differently when introduced to new climatic conditions and soil types. A clear example is the use of commercial inoculants, which are industrially produced and often introduced into different regions without considering these natural conditions, resulting in suboptimal functional performance.

4. ANALYSIS

AMF constitute an essential component of soil biota, and their role as mediators of ecological processes in soil has been extensively studied and recognized. Evidence demonstrates that these microorganisms play a determinant role in the formation and stabilization of soil aggregates, a process closely associated with the recovery of soil structure, aeration, and water-holding capacity. This is largely attributed to the growth of their extraradical hyphae, which form extensive networks that bind mineral particles and organic matter, as well as to their ability to produce glomalin and other glycoproteins that act as cementing agents for soil particles (Lehmann et al., 2020; Rillig & Mummey, 2006). Thus, AMF not only contributes to enhancing the structural stability of soil but also increases its resilience to erosion and physical degradation (Morris et al., 2019; Shukla et al., 2025).

Studies such as those by Hossain, (2021); Masebo et al., (2025) demonstrated that glomalin accumulation associated with AMF is correlated with an increase in the percentage of stable organic carbon and improved soil quality in agroecosystems. This function confers a fundamental role on AMF in regulating the carbon and phosphorus

biogeochemical cycles, as their hyphal networks promote carbon sequestration in stable soil fractions and enhance nutrient mobilization (Lehmann, et al., 2017; Rillig et al., 2015; Treseder & Allen, 2002).

With respect to edaphic biodiversity, AMF modulates soil microbial communities, influencing the composition of both bacterial and fungal communities (Han et al., 2025; J. Li et al., 2025). Mycorrhizal symbiosis establishes a rhizosphere characterized by diverse microenvironments, through the release of root and fungal derived exudates, which modify physicochemical conditions such as pH, nutrient availability, and colloidal structure, thereby stimulating beneficial microbial activity (Barea et al., 2005; Toljander et al., 2007). AMF establish hyphal networks that act as channels for communication and transfer between roots and microorganisms, generating microhabitats that promote the coexistence of plant growth-promoting bacteria, endophytic fungi, and actinobacteria. Furthermore, they contribute to the functional enrichment of soil microbiomes (Fall et al., 2022; Rillig et al., 2015; Zhang et al., 2014).

The symbiotic and mutualistic interactions established by AMF with plants and other microorganisms expand the soil food web, strengthening the functional resilience of soils to disturbances such as drought, contamination, and intensive land use (Lehmann et al., 2020; Yang et al., 2018). Therefore, AMF act as ecosystem engineers that integrate biological and physicochemical functions within soils, ensuring the continuity of nutrient cycling and sustaining plant productivity (Ndeko et al., 2024; Yang et al., 2018).

Likewise, the presence of AMF is associated with higher functional diversity and soil stability, as well as with the formation and persistence of complex soil food webs (Lethielleux-Juge, 2025). Mycelial networks and their ability to connect plants and microorganisms facilitate the transfer of carbon and nutrients, strengthening interspecific cooperation within the rhizosphere (Fellbaum et al., 2014; Luo et al., 2023). At the same time, the dispersal of AMF through biotic vectors (such as small mammals and birds) and abiotic vectors (water and wind) ensures their persistence in fragmented or degraded ecosystems, thereby contributing to the conservation of genetic diversity and, indirectly, to the ecological functioning and genetic diversity of mycorrhizal communities (Borgmann-Winter et al., 2023; Chaudhary et al., 2020; Luo et al., 2023).

AMF can be considered ecosystem engineers due to their extraordinary capacity to modify soil structure and functioning through physical, biochemical, and biological processes. However, their functionality emerges from complex interactions with host plants and the rhizosphere microbiota. Furthermore, their hyphal networks organize soil microstructure, particularly at the rhizosphere and mycorrhizosphere scales, where they

influence carbon dynamics, structural stability through increased aggregation, nutrient distribution, and microbial interactions. The magnitude and persistence of these effects are regulated by spatial and temporal scales determined by the establishment of mycorrhizal associations (plant–fungus–microbiome), as well as by environmental conditions and ecosystem management practices.

Likewise, the ability of AMF to improve soil structure, enrich microbial communities, and mediate trophic interactions makes them essential components of soil sustainability (Ai et al., 2022; Fall et al., 2022; Shukla et al., 2025). Understanding these mechanisms is crucial for promoting agricultural management and ecological restoration practices grounded in soil biology that aim to conserve biodiversity and ecosystem services.

Finally, scientific publications reveal a significant pattern of geographical and ecological biases in the literature on arbuscular mycorrhizal fungi. The largest percentage of studies focuses on temperate agricultural systems and ecosystems in North America, Europe, and China, whereas tropical ecosystems and countries with the highest levels of biodiversity remain comparatively understudied. Consequently, this research imbalance limits the broad applicability of ecological frameworks associated with the functional diversity of AMF, and our understanding of how their functions and contributions to ecosystem processes vary across geographic regions and latitudinal gradients.

5. CONCLUSIONS

AMF plays a fundamental role in the biogeochemical cycles of carbon and phosphorus by promoting carbon sequestration, contributing carbon to stable soil fractions, and optimizing phosphorus mobility and availability to plants, thereby enhancing nutrient availability and long-term soil fertility.

AMF also plays an essential role in the formation and stability of soil food webs by establishing mutualistic relationships with other organisms that strengthen ecosystem resilience. These associations sustain carbon and nutrient fluxes, contributing to biological balance and mitigating the effects of environmental disturbances such as drought, land-use change, and contamination. Within the mycorrhizosphere, symbiotic and cooperative interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microorganisms promote the development of physical, chemical, and biological processes fundamental to soil sustainability. In this way, their biological activity not only preserves microbial community diversity and the adaptive capacity of the soil–plant system under adverse conditions but also maintains plant productivity and ensures the functional dynamics of ecosystem services.

Despite advances in AMF research, their role in soil structure and function remains poorly understood. Significant knowledge gaps persist regarding the mechanisms by which they influence soil function and the specific processes they mediate. In general, AMF are often treated as a homogeneous functional group, despite limited understanding of the distinctive traits of individual species and families, particularly with respect to exudate production, extraradical hyphal growth, and their roles in processes such as carbon and nutrient transfer. Another important aspect that should be addressed in future research is how AMF interact with their host plants and other soil microorganisms. It is also important to recognize that, given the broad taxonomic diversity of this group, their biological responses to environmental and edaphic factors are not uniform. Furthermore, the molecular nature of glomalin and other AMF-associated glycoproteins remains incompletely understood, particularly regarding their chemical composition and their contribution to soil aggregate formation.

Future research should focus on multiscale, interdisciplinary approaches that integrate observational and experimental studies within the mycorrhizosphere while addressing ecosystem-level functional processes. Comparative studies of diverse AMF species and communities are also needed, incorporating transcriptomic, metabolomic, and functional trait analyses across a range of environmental contexts. Such approaches would provide a clearer understanding of the direct relationship between functional diversity and soil structural stability. Finally, greater emphasis should be placed on studies in tropical agroecosystems and degraded systems, particularly within environmental restoration and agricultural transformation frameworks, where the functional potential of AMF as key contributors to soil sustainability and functional resilience can be more effectively evaluated.

6. ACKNOWLEDGMENTS

This research was carried out through funding from the project under Call 903 within the program “Technological products and processes with rhizosphere microorganisms for the restoration of degraded soils in agroforestry and agricultural ecosystems”.

LITERATURE CITED

Agnihotri, R., Sharma, M. P., Prakash, A., Ramesh, A., Bhattacharjya, S., Patra, A. K., Manna, M. C., Kurganova, I., & Kuzyakov, Y. (2022). Glycoproteins of arbuscular mycorrhiza for soil carbon sequestration: Review of mechanisms and controls. *Science of The Total Environment*, 806, 150571. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150571>

Agnolucci, M., Avio, L., Pepe, A., Turrini, A., Cristani, C., Bonini, P., Cirino, V., Colosimo, F., Ruzzi, M., & Giovannetti, M. (2019). Bacteria Associated With a Commercial Mycorrhizal Inoculum: Community Composition and Multifunctional Activity as Assessed by Illumina Sequencing and Culture-Dependent Tools. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01956>

Ahammed, G. J., & Hajiboland, R. (2024). Introduction to Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Higher Plant Symbiosis: Characteristic Features, Functions, and Applications. In G. J. Ahammed & R. Hajiboland (Eds.), *Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Higher Plants* (pp. 1–17). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8220-2_1

Ai, Y.-J., Li, F.-P., Yang, J.-Q., Lu, S., & Gu, H.-H. (2022). Research Progress and Potential Functions of AMF and GRSP in the Ecological Remediation of Metal Tailings. *Sustainability*, 14(15), 9611. <https://doi.org/10.3390/su14159611>

Akyol, T. Y., Niwa, R., Hirakawa, H., Maruyama, H., Sato, T., Suzuki, T., Fukunaga, A., Sato, T., Yoshida, S., Tawarayama, K., Saito, M., Ezawa, T., & Sato, S. (2019). Impact of Introduction of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Root Microbial Community in Agricultural Fields. *Microbes and Environments*, 34(1), 23–32. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME18109>

Almario, J., Fabiańska, I., Saridis, G., & Bucher, M. (2022). Unearthing the plant–microbe quid pro quo in root associations with beneficial fungi. *New Phytologist*, 234(6), 1967–1976. <https://doi.org/10.1111/nph.18061>

Alptekin, B., Hirsch, H., Kleven, B., King, L., McLimans, C., Daniels, D., Irving, T., Floss, D., & Ané, J. (2025). From glomalin to glomalose: unraveling the molecular identity of the MAb32B11 antigen. *New Phytologist*, 247(5), 2328–2341. <https://doi.org/10.1111/nph.70253>

Ansari, Mohd. M., Bisht, N., Singh, T., & Chauhan, P. S. (2024). Symphony of survival: Insights into cross-talk mechanisms in plants, bacteria, and fungi for strengthening plant immune responses. *Microbiological Research*, 285, 127762. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127762>

Artursson, V., Finlay, R. D., & Jansson, J. K. (2006). Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria and their potential for stimulating plant growth. *Environmental Microbiology*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00942.x>

Aseel, D. G., Ibrahim, O. M., Elbeaino, T., Al-Askar, A. A., & Abdelkhalek, A. (2025). Impacts of arbuscular mycorrhizal and *Trichoderma viride* on enhancing physicochemical properties and triggering defense mechanisms of tomato plants challenged with potato virus Y. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1650871>

Aseel, D. G., Rashad, Y. M., & Hammad, S. M. (2019). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Trigger Transcriptional Expression of Flavonoid and Chlorogenic Acid Biosynthetic Pathways Genes in Tomato against Tomato Mosaic Virus. *Scientific Reports*, 9(1), 9692. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46281-x>

Aspray, T. J., Jones, E. E., Davies, M. W., Shipman, M., & Bending, G. D. (2013). Increased hyphal branching and growth of ectomycorrhizal fungus *Lactarius rufus* by the helper bacterium *Paenibacillus* sp. *Mycorrhiza*, 23(5), 403–410. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0483-1>

Azizi, S., Tabari Kouchaksaraei, M., Hadian, J., Fallah Nosrat Abad, A. R., Modarres Sanavi, S. A. M., Ammer, C., & Bader, M. K.-F. (2021). Dual inoculations of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria boost drought resistance and essential oil yield of common myrtle. *Forest Ecology and Management*, 497, 119478. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119478>

Barea, J.-M., Azcón, R., & Azcón-Aguilar, C. (2002). Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81(1), 343–351. <https://doi.org/10.1023/A:1020588701325>

- Barea, J.-M., Pozo, M. J., Azcón, R., & Azcón-Aguilar, C. (2005). Microbial co-operation in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 56(417), 1761–1778. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri197>
- Barto, E. K., Alt, F., Oelmann, Y., Wilcke, W., & Rillig, M. C. (2010). Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(12), 2316–2324. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.008>
- Bernados, L. C., Espineli, J. P., Anarna, J. A., & Aggangan, N. S. (2024). Increasing Tomato Productivity through Integrated Nutrient Sources and Inoculation with Arbuscular Mycorrhizal Fungi and *Azospirillum* spp. *Horticulturae*, 10(10), 1056. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10101056>
- Bharadwaj, D. P., Lundquist, P.-O., & Alström, S. (2008). Arbuscular mycorrhizal fungal spore-associated bacteria affect mycorrhizal colonization, plant growth and potato pathogens. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(10), 2494–2501. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.06.012>
- Bonfante, P., & Anca, I.-A. (2009). Plants, Mycorrhizal Fungi, and Bacteria: A Network of Interactions. *Annual Review of Microbiology*, 63(1), 363–383. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.091208.073504>
- Borgmann-Winter, B. W., Stephens, R. B., Anthony, M. A., Frey, S. D., D'Amato, A. W., & Rowe, R. J. (2023). Wind and Small Mammals Disperse Complementary Fungal Communities. *The Bulletin of the Ecological Society of America*, 104(3). <https://doi.org/10.1002/bes2.2090>
- Borie, F., Rubio, R., & Morales, A. (2008). Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 8(2), 9–18. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000200003>
- Bueno de Mesquita, C. P., Sartwell, S. A., Ordemann, E. V., Porazinska, D. L., Farrer, E. C., King, A. J., Spasojevic, M. J., Smith, J. G., Suding, K. N., & Schmidt, S. K. (2018). Patterns of root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes across a mostly-unvegetated, high-elevation landscape. *Fungal Ecology*, 36, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2018.07.009>
- Chaudhary, V. B., Nolimal, S., Sosa-Hernández, M. A., Egan, C., & Kastens, J. (2020). Trait-based aerial dispersal of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 228(1), 238–252. <https://doi.org/10.1111/nph.16667>
- Chaudhry, M. S., Rahman, S. U., Ismail, M. S., Sarwar, G., Saeed, B., & Nasim, F.-H. (2009). Coexistence of arbuscular mycorrhizae and dark septate endophytic fungi in an undisturbed and a disturbed site of an arid ecosystem. *Symbiosis*, 49(1), 19–28. <https://doi.org/10.1007/s13199-009-0010-5>
- Chen, J., Chen, J., Tan, M., & GongZi-tong. (2002). Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences*, 12(2), 243–252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02837480>
- Correia, M., Heleno, R., da Silva, L. P., Costa, J. M., & Rodríguez-Echeverría, S. (2019). First evidence for the joint dispersal of mycorrhizal fungi and plant diaspores by birds. *New Phytologist*, 222(2), 1054–1060. <https://doi.org/10.1111/nph.15571>
- Costa, O. Y. A., Raaijmakers, J. M., & Kuramae, E. E. (2018). Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function and Impact on Soil Aggregation. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636>
- Davison, J., García de León, D., Zobel, M., Moora, M., Bueno, C. G., Barceló, M., Gerz, M., León, D., Meng, Y., Pillar, V. D., Sepp, S., Soudzilovskaia, N. A., Tedersoo, L., Vaessen, S., Vahter, T., Winck, B., & Öpik, M. (2020). Plant functional groups associate with distinct arbuscular mycorrhizal fungal communities. *New Phytologist*, 226(4), 1117–1128. <https://doi.org/10.1111/nph.16423>

de los Santos-Villalobos, S., & Parra-Cota, F. I. (2021). Current trends in plant growth-promoting microorganisms research for sustainable food security. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2020.100016>

Debray, R., Socolar, Y., Kaulbach, G., Guzman, A., Hernandez, C. A., Curley, R., Dhond, A., Bowles, T., & Koskella, B. (2022). Water stress and disruption of mycorrhizas induce parallel shifts in phyllosphere microbiome composition. *New Phytologist*, 234(6), 2018–2031. <https://doi.org/10.1111/nph.17817>

Ebrahimi, S., Eini, O., & Koolivand, D. (2020). Arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances virus accumulation and attenuates resistance-related gene expression in tomato plants infected with Beet curly top Iran virus. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 127(3), 341–348. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00299-w>

Elliott, T. F., Truong, C., Jackson, S. M., Zúñiga, C. L., Trappe, J. M., & Vernes, K. (2022). Mammalian Mycophagy: a Global Review of Ecosystem Interactions Between Mammals and Fungi. *Fungal Systematics and Evolution*, 9(1), 99–159. <https://doi.org/10.3114/fuse.2022.09.07>

Emmett, B. D., Lévesque-Tremblay, V., & Harrison, M. J. (2021). Conserved and reproducible bacterial communities associate with extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *The ISME Journal*, 15(8), 2276–2288. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00920-2>

Enebe, M. C., & Erasmus, M. (2023). Symbiosis – A Perspective on the Effects of Host Traits and Environmental Parameters in Arbuscular Mycorrhizal Fungal Richness, Colonization and Ecological Functions. *Agriculture*, 13(10), 1899. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101899>

Enkhtuya, B., & Vosátka, M. (2005). Interaction between grass and trees mediated by extraradical mycelium of symbiotic arbuscular mycorrhizal fungi. *Symbiosis*, 38, 261–277. <https://dalspace.library.dal.ca/server/api/core/bitstreams/3cd2843c-76ef-4eb6-b77a-a83435e9c59b/content>

Faghihinia, M., Halverson, L. J., Hršelová, H., Bukovská, P., Rozmoš, M., Kotianová, M., & Jansa, J. (2024). Nutrient-dependent cross-kingdom interactions in the hyphosphere of an arbuscular mycorrhizal fungus. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1284648>

Fall, A. F., Nakabonge, G., Ssekandi, J., Founoune-Mboup, H., Apori, S. O., Ndiaye, A., Badji, A., & Ngom, K. (2022). Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Soil Fertility: Contribution in the Improvement of Physical, Chemical, and Biological Properties of the Soil. *Frontiers in Fungal Biology*, 3. <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.723892>

Fellbaum, C. R., Mensah, J. A., Cloos, A. J., Strahan, G. E., Pfeffer, P. E., Kiers, E. T., & Bücking, H. (2014). Fungal nutrient allocation in common mycorrhizal networks is regulated by the carbon source strength of individual host plants. *New Phytologist*, 203(2), 646–656. <https://doi.org/10.1111/nph.12827>

Frey-Klett, P., & Garbaye, J. (2005). Mycorrhiza helper bacteria: a promising model for the genomic analysis of fungal–bacterial interactions. *New Phytologist*, 168(1), 4–8. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01553.x>

Frey-Klett, P., Garbaye, J., & Tarkka, M. (2007). The mycorrhiza helper bacteria revisited. *New Phytologist*, 176(1), 22–36. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02191.x>

Garbaye, J. (1994). Tansley Review No. 76 Helper bacteria: a new dimension to the mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*, 128(2), 197–210. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb04003.x>

García-Mares, A., Moreno-Espíndola, I. P., Carballar-Hernández, S., Gama-Flores, J. L., & Ferrara-Guerrero, M. J. (2024). Colonization Patterns by Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Dark Septate Endophytes in a Forest Ecosystem of the Municipality of Isidro Fabela, State of Mexico. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 42. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1760>

Giovannini, L., Palla, M., Agnolucci, M., Avio, L., Sbrana, C., Turrini, A., & Giovannetti, M. (2020). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Associated Microbiota as Plant Biostimulants: Research Strategies for the Selection of the Best Performing Inocula. *Agronomy*, 10(1), 106. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010106>

Gómez-Leyva, J. F., Segura-Castruita, M. A., Hernández-Cuevas, L. V., & Íñiguez-Rivas, M. (2023). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Maize (*Zea mays* L.) in the Formation and Stability of Aggregates in Two Types of Soil. *Microorganisms*, 11(11), 2615. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112615>

Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 8, Number 3). <https://doi.org/10.3390/su8030281>

Gong, M., Bai, N., Wang, P., Su, J., Chang, Q., & Zhang, Q. (2023). Co-Inoculation with Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Dark Septate Endophytes under Drought Stress: Synergistic or Competitive Effects on Maize Growth, Photosynthesis, Root Hydraulic Properties and Aquaporins? *Plants*, 12(14), 2596. <https://doi.org/10.3390/plants12142596>

Guo, L., Shen, J., Li, B., Li, Q., Wang, C., Guan, Y., D'Acqui, L. P., Luo, Y., Tao, Q., Xu, Q., Li, H., Yang, J., & Tang, X. (2019). Impacts of agricultural land use change on soil aggregate stability and physical protection of organic C. *Science of The Total Environment*, 707, 136049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136049>

Han, Y., Yuan, G., Yang, X., Fang, L., Liang, Y., Zhou, B., & Wei, Z. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance soil nutrient cycling by regulating soil bacterial community structures in mango orchards with different soil fertility rates. *Frontiers in Microbiology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1615694>

Hossain, MD. B. (2021). Glomalin and Contribution of Glomalin to Carbon Sequestration in Soil: A Review. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(1), 191–196. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i1.191-196.3803>

Hu, W., Cichota, R., Beare, M., Müller, K., Drewry, J., & Eger, A. (2023). Soil structural vulnerability: Critical review and conceptual development. *Geoderma*, 430. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116346>

Huang, W., van Bodegom, P. M., Declerck, S., Heinonsalo, J., Cosme, M., Viskari, T., Liski, J., & Soudzilovskaia, N. A. (2022). Mycelium chemistry differs markedly between ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal fungi. *Communications Biology*, 5(1), 398. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03341-9>

Huey, C. J., Gopinath, S. C. B., Uda, M. N. A., Zulhaimi, H. I., Jaafar, M. N., Kasim, F. H., & Yaakub, A. R. W. (2020). Mycorrhiza: a natural resource assists plant growth under varied soil conditions. *3 Biotech*, 10(5), 204. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02188-3>

Janoušková, M., Remke, M., Johnson, N. C., Blažková, A., Rydlová, J., Kolaříková, Z., & Bowker, M. A. (2023). Transferred communities of arbuscular mycorrhizal fungal persist in novel climates and soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 187, 109190. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109190>

Jansa, J., Mozafar, A., & Frossard, E. (2003). Long-distance transport of P and Zn through the hyphae of an arbuscular mycorrhizal fungus in symbiosis with maize. *Agronomie*, 23(5–6), 481–488. <https://doi.org/10.1051/agro:2003013>

Ji, L., Chen, X., Huang, C., & Tan, W. (2024). Arbuscular mycorrhizal hyphal networks and glomalin-related soil protein jointly promote soil aggregation and alter aggregate hierarchy in Calcaric Regosol. *Geoderma*, 452, 117096. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117096>

Jiang, Y., Luan, L., Hu, K., Liu, M., Chen, Z., Geisen, S., Chen, X., Li, H., Xu, Q., Bonkowski, M., & Sun, B. (2020). Trophic interactions as determinants of the arbuscular mycorrhizal fungal community with cascading plant-promoting consequences. *Microbiome*, 8(1), 142. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00918-6>

Jiménez-Martínez, A., Gutiérrez-Castorena, Ma. del C., Montaña, N. M., Gutiérrez-Castorena, E. V., Alarcón, A., & Gavito, M. E. (2024). Micromorphology and thematic micro-mapping reveal differences in the soil structuring traits of three arbuscular mycorrhizal fungi. *Pedobiologia*, 104, 150953. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150953>

Kakouridis, A., Yuan, M., Nuccio, E. E., Hagen, J. A., Fossum, C. A., Moore, M. L., Estera-Molina, K. Y., Nico, P. S., Weber, P. K., Pett-Ridge, J., & Firestone, M. K. (2024). Arbuscular mycorrhiza convey significant plant carbon to a diverse hyphosphere microbial food web and mineral-associated organic matter. *New Phytologist*, 242(4), 1661–1675. <https://doi.org/10.1111/nph.19560>

Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Titttonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., van der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., & Fresco, L. O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2(2), 111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>

Klironomos, J., & Hart, M. (2002). Colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi using different sources of inoculum. *Mycorrhiza*, 12(4), 181–184. <https://doi.org/10.1007/s00572-002-0169-6>

Klironomos, J. N., Allen, M. F., Rillig, M. C., Piotrowski, J., Makvandi-Nejad, S., Wolfe, B. E., & Powell, J. R. (2005). Abrupt rise in atmospheric CO₂ overestimates community response in a model plant–soil system. *Nature*, 433(7026), 621–624. <https://doi.org/10.1038/nature03268>

Klironomos, J. N., & Kendrick, W. B. (1996). Palatability of microfungi to soil arthropods in relation to the functioning of arbuscular mycorrhizae. *Biology and Fertility of Soils*, 21(1–2), 43–52. <https://doi.org/10.1007/BF00335992>

Kokkoris, V., Lekberg, Y., Antunes, P. M., Fahey, C., Fordyce, J. A., Kivlin, S. N., & Hart, M. M. (2020). Codependency between plant and arbuscular mycorrhizal fungal communities: what is the evidence? *New Phytologist*, 228(3), 828–838. <https://doi.org/10.1111/nph.16676>

Lanfranco, L., Bonfante, P., & Genre, A. (2016). The Mutualistic Interaction between Plants and Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Microbiology Spectrum*, 4(6). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0012-2016>

Lehmann, A., Leifheit, E. F., & Rillig, M. C. (2017). Mycorrhizas and Soil Aggregation. In N. Collins Johnson, C. Gehring, & J. Jansa (Eds.), *Mycorrhizal Mediation of Soil* (pp. 241–262). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804312-7.00014-0>

Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2015). Understanding mechanisms of soil biota involvement in soil aggregation: A way forward with saprobic fungi? *Soil Biology and Biochemistry*, 88, 298–302. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.006>

Lehmann, A., Zheng, W., & Rillig, M. C. (2017). Soil biota contributions to soil aggregation. *Nature Ecology & Evolution*, 1(12), 1828–1835. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0344-y>

Lehmann, A., Zheng, W., Ryo, M., Soutschek, K., Roy, J., Rongstock, R., Maaß, S., & Rillig, M. C. (2020). Fungal Traits Important for Soil Aggregation. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02904>

- Lethielleux-Juge, C. (2025). Review: roles of mycorrhizal symbioses and associated soil microbiomes in ecological restoration. *Frontiers in Microbiology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1456041>
- Li, J., Zhou, L., Chen, G., Yao, M., Liu, Z., Li, X., Yang, X., Yang, Y., Cai, D., Tuerxun, Z., Li, B., Nie, T., & Chen, X. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance drought resistance and alter microbial communities in maize rhizosphere soil. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103947. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103947>
- Li, Z., Wu, S., Yi, Q., Liu, Y., Wang, J., Nguyen, T. A. H., Ma, Y., You, F., Chan, T.-S., Klein, A., Levett, A., Southam, G., Alessi, D. S., Huang, Y., & Huang, L. (2023). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Drive Organo-Mineral Association in Iron Ore Tailings: Unravelling Microstructure at the Submicron Scale by Synchrotron-Based FTIR and STXM-NEXAFS. *Environmental Science & Technology*, 57(51), 21779–21790. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07614>
- Liu, L., Gunina, A., Zhang, F., Cui, Z., & Tian, J. (2023). Fungal necromass increases soil aggregation and organic matter chemical stability under improved cropland management and natural restoration. *Science of The Total Environment*, 858, 159953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159953>
- Lu, Y., Yan, Y., Qin, J., Ou, L., Yang, X., Liu, F., & Xu, Y. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance phosphate uptake and alter bacterial communities in maize rhizosphere soil. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206870>
- Lugo, M. A., Menoyo, E., Allione, L. R., Negritto, M. A., Henning, J. A., & Anton, A. M. (2018). Arbuscular mycorrhizas and dark septate endophytes associated with grasses from the Argentine Puna. *Mycologia*, 110(4), 654–665. <https://doi.org/10.1080/00275514.2018.1492846>
- Luo, X., Liu, Y., Li, S., & He, X. (2023). Interplant carbon and nitrogen transfers mediated by common arbuscular mycorrhizal networks: beneficial pathways for system functionality. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1169310>
- Maffei, G., Miozzi, L., Fiorilli, V., Novero, M., Lanfranco, L., & Accotto, G. P. (2014). The arbuscular mycorrhizal symbiosis attenuates symptom severity and reduces virus concentration in tomato infected by Tomato yellow leaf curl Sardinia virus (TYLCSV). *Mycorrhiza*, 24(3), 179–186. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0527-6>
- Mahmud, M. S., & Chong, K. P. (2021). Formulation of biofertilizers from oil palm empty fruit bunches and plant growth-promoting microbes: A comprehensive and novel approach towards plant health. *Journal of King Saud University - Science*, 33(8), 101647. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101647>
- Mangan, S. A., & Adler, G. H. (2000). Consumption of arbuscular mycorrhizal fungi by terrestrial and arboreal small mammals in a panamanian cloud forest. *Journal of Mammalogy*, 81(2), 563–570. [https://doi.org/10.1644/1545-1542\(2000\)081<0563:COAMFB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1644/1545-1542(2000)081<0563:COAMFB>2.0.CO;2)
- Masebo, N., Birhane, E., Takele, S., Perez-Sanz, A., Lucena, J. J., Belay, Z., Anjulo, A., & Yunta, F. (2025). Glomalin related soil protein, soil aggregate stability and soil aggregate-associated organic carbon under agroforestry practices in southern Ethiopia. *BMC Ecology and Evolution*, 25(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s12862-025-02365-z>
- Morris, E. K., Morris, D. J. P., Vogt, S., Gleber, S.-C., Bigalke, M., Wilcke, W., & Rillig, M. C. (2019). Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi. *The ISME Journal*, 13(7), 1639–1646. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0369-0>
- Nagy, V., Sándor, R., Klem, K., & Urban, O. (2026). Functional limitations of glomalin-related soil protein as an indicator of arbuscular mycorrhizal fungi while remaining relevant to soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, 214, 110076. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.110076>

Nasslahsen, B., Prin, Y., Ferhout, H., Smouni, A., & Duponnois, R. (2022). Mycorrhizae helper bacteria for managing the mycorrhizal soil infectivity. *Frontiers in Soil Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.979246>

Ndeko, A. B., Chuma, G. B., Kane, A., & Mushagalusa, G. N. (2024). Soil fertility and crop biofortification: is there potential improvement through arbuscular mycorrhizal symbiosis in Sub-Saharan Africa? *Discover Soil*, 1(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00019-y>

Netherway, T., Bengtsson, J., Krab, E. J., & Bahram, M. (2021). Biotic interactions with mycorrhizal systems as extended nutrient acquisition strategies shaping forest soil communities and functions. *Basic and Applied Ecology*, 50, 25–42. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.10.002>

Olk, D. C., Bloom, P. R., Perdue, E. M., McKnight, D. M., Chen, Y., Farenhorst, A., Senesi, N., Chin, Y. -P., Schmitt-Kopplin, P., Hertkorn, N., & Harir, M. (2019). Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters. *Journal of Environmental Quality*, 48(2), 217–232. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0041>

Pandit, A., Kochar, M., Srivastava, S., Johnny, L., & Adholeya, A. (2022). Diversity and Functionalities of Unknown Mycorrhizal Fungal Microbiota. *Microbiological Research*, 256, 126940. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126940>

Pauwels, R., Graefe, J., & Bitterlich, M. (2023). An arbuscular mycorrhizal fungus alters soil water retention and hydraulic conductivity in a soil texture specific way. *Mycorrhiza*, 33(3), 165–179. <https://doi.org/10.1007/s00572-023-01106-8>

Paz, C., Öpik, M., Bulascoschi, L., Bueno, C. G., & Galetti, M. (2021). Dispersal of Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Evidence and Insights for Ecological Studies. *Microbial Ecology*, 81(2), 283–292. <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01582-x>

Philippot, L., Chenu, C., Kappler, A., Rillig, M. C., & Fierer, N. (2024). The interplay between microbial communities and soil properties. *Nature Reviews Microbiology*, 22(4), 226–239. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00980-5>

Piotrowski, J. S., Denich, T., Klironomos, J. N., Graham, J. M., & Rillig, M. C. (2004). The effects of arbuscular mycorrhizas on soil aggregation depend on the interaction between plant and fungal species. *New Phytologist*, 164(2), 365–373. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01181.x>

Postma-Blaauw, M. B., De Goede, M., Bloem, J., Faber, J. H., & Brussaard, L. (2010). Soil biota community structure and abundance under agricultural intensification and extensification. *Ecology*, 91(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1890/09-0666.1>

Qin, Z.-F., Xie, M.-X., Zhang, Y., Li, X., Li, H., & Zhang, J. (2023). Research progress in soil organic carbon stabilization mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 29(4), 756–766.

Rabbi, S. M. F., Daniel, H., Lockwood, P. V., Macdonald, C., Pereg, L., Tighe, M., Wilson, B. R., & Young, I. M. (2016). Physical soil architectural traits are functionally linked to carbon decomposition and bacterial diversity. *Scientific Reports*, 6(1), 33012. <https://doi.org/10.1038/srep33012>

Rashad, Y. M., El-Sharkawy, H. H., Abdalla, S. A., Ibrahim, O. M., & Elazab, N. T. (2023). Mycorrhizal colonization and *Streptomyces viridosporus* HH1 synergistically up-regulate the polyphenol biosynthesis genes in wheat against stripe rust. *BMC Plant Biology*, 23(1), 388. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04395-5>

Řezáčová, V., Czako, A., Stehlik, M., Mayerová, M., Šimon, T., Smatanová, M., & Madaras, M. (2021). Organic fertilization improves soil aggregation through increases in abundance of eubacteria and products of arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientific Reports*, 11(1), 12548. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91653-x>

Richter, F., Calonne-Salmon, M., van der Heijden, M. G. A., Declerck, S., & Stanley, C. E. (2024). AMF-SporeChip provides new insights into arbuscular mycorrhizal fungal asymbiotic hyphal growth dynamics at the cellular level. *Lab on a Chip*, 24(7), 1930–1946. <https://doi.org/10.1039/D3LC00859B>

Rigamonte, T. A., Pylro, V. S., & Duarte, G. F. (2010). The role of mycorrhization helper bacteria in the establishment and action of ectomycorrhizae associations. *Brazilian Journal of Microbiology*, 41(4), 832–840. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000400002>

Rillig, M. C., Aguilar-Trigueros, C. A., Bergmann, J., Verbruggen, E., Veresoglou, S. D., & Lehmann, A. (2015). Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytologist*, 205(4), 1385–1388. <https://doi.org/10.1111/nph.13045>

Rillig, M. C., & Mummey, D. L. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171(1), 41–53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>

Rodriguez-Garcia, D. R., & Müller, L. M. (2026). Signaling at the interface: The cell wall, peptides, and extracellular vesicles mediate partner communication during arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Current Opinion in Plant Biology*, 89, 102849. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2025.102849>

Roesti, D., Ineichen, K., Braissant, O., Redecker, D., Wiemken, A., & Aragno, M. (2005). Bacteria Associated with Spores of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi *Glomus geosporum* and *Glomus constrictum*. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(11), 6673–6679. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.6673-6679.2005>

Ruiz-Lozano, J. M., Porcel, R., Azcon, C., & Aroca, R. (2012). Regulation by arbuscular mycorrhizae of the integrated physiological response to salinity in plants: new challenges in physiological and molecular studies. *Journal of Experimental Botany*, 63(11), 4033–4044. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers126>

Sangwan, S., & Prasanna, R. (2022). Mycorrhizae Helper Bacteria: Unlocking Their Potential as Bioenhancers of Plant–Arbuscular Mycorrhizal Fungal Associations. *Microbial Ecology*, 84(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00248-021-01831-7>

Shukla, S., Didwania, N., & Choudhary, R. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF): a pathway to sustainable soil health, carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 24(4), 22. <https://doi.org/10.1007/s44447-025-00023-w>

Son, Y., Martínez, C. E., & Kao-Kniffin, J. (2024). Three important roles and chemical properties of glomalin-related soil protein. *Frontiers in Soil Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1418072>

Spohn, M., & Giani, L. (2011). Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(5), 1081–1088. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.029>

Stephens, R. B., Frey, S. D., D'Amato, A. W., & Rowe, R. J. (2021). Functional, temporal and spatial complementarity in mammal-fungal spore networks enhances mycorrhizal dispersal following forest harvesting. *Functional Ecology*, 35(9), 2072–2083. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13855>

Tahat, M. M., Alananbeh, K. M., Othman, Y. A., & Leskovar, D. I. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/SU12124859>

Tao, J., & Liu, X. (2024). Does arbuscular mycorrhizal fungi inoculation influence soil carbon sequestration? *Biology and Fertility of Soils*, 60(2), 213–225. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01793-1>

Toljander, J. F., Lindahl, B. D., Paul, L. R., Elfstrand, M., & Finlay, R. D. (2007). Influence of arbuscular mycorrhizal mycelial exudates on soil bacterial growth and community structure. *FEMS Microbiology Ecology*, 61(2), 295–304. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00337.x>

Treseder, K. K., & Allen, M. F. (2002). Direct nitrogen and phosphorus limitation of arbuscular mycorrhizal fungi: a model and field test. *New Phytologist*, 155(3), 507–515. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00470.x>

Turrini, A., Avio, L., Giovannetti, M., & Agnolucci, M. (2018). Functional Complementarity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Associated Microbiota: The Challenge of Translational Research. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01407>

Vivas, A., Marulanda, A., Ruiz-Lozano, J. M., Barea, J. M., & Azcón, R. (2003). Influence of a *Bacillus* sp. on physiological activities of two arbuscular mycorrhizal fungi and on plant responses to PEG-induced drought stress. *Mycorrhiza*, 13(5), 249–256. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0223-z>

Wang, F., & Feng, G. (2021). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Interactions in the Rhizosphere. In V. V. S. R. Gupta & A. K. Sharma (Eds.), *Rhizosphere Biology: Interactions Between Microbes and Plants* (pp. 217–235). https://doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2_11

Wang, F., & Rengel, Z. (2024). Disentangling the contributions of arbuscular mycorrhizal fungi to soil multifunctionality. *Pedosphere*, 34(2), 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.12.015>

Wang, F., Zhang, L., Zhou, J., Rengel, Z., George, T. S., & Feng, G. (2022). Exploring the secrets of hyphosphere of arbuscular mycorrhizal fungi: processes and ecological functions. *Plant and Soil*, 481(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05621-z>

Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M., & Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>

Wang, L., George, T. S., & Feng, G. (2024). Concepts and consequences of the hyphosphere core microbiome for arbuscular mycorrhizal fungal fitness and function. *New Phytologist*, 242(4), 1529–1533. <https://doi.org/10.1111/nph.19396>

Wang, Z., Wang, L., Liang, X., Zhang, G., Li, Z., Yang, Z., & Zhan, F. (2024). The coexistence of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes synergistically enhanced the cadmium tolerance of maize. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1349202>

Wardle, D. A. (2006). The influence of biotic interactions on soil biodiversity. *Ecology Letters*, 9(7), 870–886. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00931.x>

Werner, G. D. A., Strassmann, J. E., Ivens, A. B. F., Engelmoer, D. J. P., Verbruggen, E., Queller, D. C., Noë, R., Johnson, N. C., Hammerstein, P., & Kiers, E. T. (2014). Evolution of microbial markets. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(4), 1237–1244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315980111>

Wilkes, T. I., Warner, D. J., Edmonds-Brown, V., Davies, K. G., & Denholm, I. (2021). Zero Tillage Systems Conserve Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Enhancing Soil Glomalin and Water Stable Aggregates with Implications for Soil Stability. *Soil Systems*, 5(1), 4. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010004>

Wilpiszeski, R. L., Aufrecht, J. A., Retterer, S. T., Sullivan, M. B., Graham, D. E., Pierce, E. M., Zablocki, O. D., Palumbo, A. V., & Elias, D. A. (2019). Soil Aggregate Microbial Communities: Towards Understanding Microbiome Interactions at Biologically Relevant Scales. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(14). <https://doi.org/10.1128/AEM.00324-19>

Woldemar, E. (1907). *Soils, their formation, properties, composition, and relations to climate and plant growth in the humid and arid regions*. New York, Macmillan, 1907. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/65783>

Xavier, L. J. C., & Germida, J. J. (2003). Bacteria associated with *Glomus clarum* spores influence mycorrhizal activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(3), 471–478. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00003-8)

Xie, L., Bi, Y., Ma, S., Shang, J., Hu, Q., & Christie, P. (2021). Combined inoculation with dark septate endophytes and arbuscular mycorrhizal fungi: synergistic or competitive growth effects on maize? *BMC Plant Biology*, 21(1), 498. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03267-0>

Yang, G., Wagg, C., Veresoglou, S. D., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). How Soil Biota Drive Ecosystem Stability. *Trends in Plant Science*, 23(12), 1057–1067. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.09.007>

Yang, M., Song, Y., Ma, H., Li, Z., Ding, J., Yin, T., Niu, K., Sun, S., Qi, J., Lu, G., Fazal, A., Yang, Y., & Wen, Z. (2024). Unveiling the hidden world: How arbuscular mycorrhizal fungi and its regulated core fungi modify the composition and metabolism of soybean rhizosphere microbiome. *Environmental Microbiome*, 19(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s40793-024-00624-y>

Yuan, M. M., Kakouridis, A., Starr, E., Nguyen, N., Shi, S., Pett-Ridge, J., Nuccio, E., Zhou, J., & Firestone, M. (2021). Fungal-Bacterial Cooccurrence Patterns Differ between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Nonmycorrhizal Fungi across Soil Niches. *MBio*, 12(2). <https://doi.org/10.1128/mBio.03509-20>

Yudina, A., & Kuzyakov, Y. (2023). Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma*, 434, 116478. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478>

Zaharick, J., Beck, H., & Beauchamp, V. (2015). An Experimental Test of Epi- and Endozoochory of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Spores by Small Mammals in a Maryland Forest. *Northeastern Naturalist*, 22(1), 163–177. <https://doi.org/10.1656/045.022.0123>

Zhang, L., Fan, J., Ding, X., He, X., Zhang, F., & Feng, G. (2014). Hyphosphere interactions between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate solubilizing bacterium promote phytate mineralization in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 74, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.004>

Zhang, L., Zhou, J., George, T. S., Limpens, E., & Feng, G. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi conducting the hyphosphere bacterial orchestra. *Trends in Plant Science*, 27(4), 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.10.008>

Zhang, R.-Q., Zhu, H.-H., Zhao, H.-Q., & Yao, Q. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungal inoculation increases phenolic synthesis in clover roots via hydrogen peroxide, salicylic acid and nitric oxide signaling pathways. *Journal of Plant Physiology*, 170(1), 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.08.022>

Zhao, H., Liu, Z., Han, Y., & Cao, J. (2024). Impact of Silver Nanoparticles on Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Glomalin-Related Soil Proteins in the Rhizosphere of Maize Seedlings. *Diversity*, 16(5), 273. <https://doi.org/10.3390/d16050273>

Zhou, J., Bilyera, N., Guillaume, T., Yang, H., Li, F.-M., & Shi, L. (2024). Microbial necromass and glycoproteins for determining soil carbon formation under arbuscular mycorrhiza symbiosis. *Science of The Total Environment*, 955, 176732. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176732>

CAPÍTULO 6

AISLAMIENTO DE BACTERIAS DEGRADADORAS DE LIGNINA DE SUELO RIZOSFERICO DE *QUERCUS SPP.*¹

Data de submissão: 13/08/2026

Data de aceite: 28/08/2026

Ramiro Ríos Gómez

Maestro en Ciencias

Facultad de Estudios Superiores

Zaragoza, UNAM

C.P. 09230, Ciudad de México, México

<https://orcid.org/0000-0002-3466-3887>

SCOPUS: 37068052100

Iván Hernández Portillo

Biólogo

Facultad de Estudios Superiores

Zaragoza, UNAM

C.P. 90640, San Miguel Contla, México

<https://orcid.org/0009-0001-0905-7762>

Yadira Cornejo Silva

Doctora en Ciencias

Facultad de Estudios Superiores

Zaragoza, UNAM

C.P. 90640, San Miguel Contla, México

<https://orcid.org/0009-0002-0710-5465>

María Yolanda Ríos Gómez

Doctora en Ciencias

Centro de Investigaciones Químicas

IICBA, UAEM

C.P. 62209 Cuernavaca, México

<https://orcid.org/0000-0002-8875-8734>

SCOPUS: 7101679320

RESUMEN: La lignina constituye uno de los principales componentes del carbono orgánico del suelo; sin embargo, su biodegradación y transformación dentro del mismo permanece poco caracterizada, estudios recientes han permitido visibilizar el papel de ciertos microorganismos en este proceso. El presente trabajo se centró en el estudio exploratorio de las comunidades bacterianas rizosféricas de *Quercus spp.* cultivables, capaces de degradar la lignina, en medios de cultivo adicionados con lignina organosolv extraída de raíces de *Quercus* nativos del ecosistema y lignina Kraft comercial. Se comprobó mediante análisis espectrofotométricos UV-Vis y RMN que la Lignina extraída del ecosistema, presenta una mayor proporción de enlaces β -O-4 y grupos fenólicos libres, lo que favorece la degradación, sin embargo, la presencia de señales relacionadas a enlaces con hemicelulosa, indican dificultades en el acoplamiento enzimático. Los cultivos selectivos permitieron identificar 23 aislamientos bacterianos y 9 para actinomicetos, con actividad ligninolítica, comprobada a través de pruebas de

¹ Agradezco el apoyo económico brindado a través del proyecto DGAPA PAPIIT clave IN222521 "Degradación de la lignina y su contribución como fuente de carbono al humus del suelo". Este respaldo fue fundamental para la culminación del presente trabajo. Mismo que se derivó de tesis de licenciatura y fue presentado en 49.º Congreso Mexicano de la Ciencia del Suelo.

degradación con azul anilina. Los resultados muestran que la lignina Organosolv favorece el crecimiento de una comunidad microbiana complementaria a la de la lignina Kraft comercial, además de que facilita el aislamiento de cepas con potencial biotecnológico. Estos hallazgos aportan conocimiento esencial sobre las interacciones entre lignina y bacterias del suelo.

PALABRAS CLAVE: Organosolv; Kraft; Actinomicetos; Medios selectivos, Espectrofotometría.

ISOLATION OF LIGNIN-DEGRADING BACTERIA FROM QUERCUS SPP. RHIZOSPHERE SOIL

ABSTRACT: Lignin is one of the main components of soil organic carbon; however, its biodegradation and subsequent transformation in the soil remain poorly characterized. Recent studies have begun to shed light on the role of certain microorganisms in this process. This exploratory study focused on culturable lignin-degrading bacterial communities from the rhizosphere of *Quercus spp.*, using culture media supplemented with either organosolv lignin extracted from the roots of native *Quercus* trees or commercial Kraft lignin. UV-Vis spectrophotometry and NMR analyses confirmed that the ecosystem-derived lignin contains a higher proportion of β -O-4 bonds and free phenolic groups, which are favorable for degradation; nevertheless, the presence of signals associated with hemicellulose linkages suggests potential constraints for enzymatic coupling. Selective cultures yielded 23 bacterial and 9 actinomycete isolates exhibiting ligninolytic activity, as verified by aniline blue degradation assays. Our results indicate that this organosolv lignin promotes the growth of a microbial community distinct from, yet complementary to, that supported by commercial Kraft lignin, while also facilitating the isolation of strains with biotechnological potential. These findings provide essential insights into the interactions between lignin and soil bacteria.

KEYWORDS: Organosolv; Kraft; Actinomycetes; Selective media; Spectrophotometry.

1. INTRODUCCIÓN

La lignina es la fuente principal de compuestos aromáticos en la biosfera, además del segundo biopolímero más abundante en las plantas (Yaovapa, 2005). Su estructura compleja y propiedades recalcitrantes, limitan su biodegradación e incorporación al suelo y constituyen uno de los procesos ecológicos más complejos en la biosfera (Ortiz, 2009; Montoya *et al.*, 2014). Pese a que los hongos Basidiomicetos son reconocidos como los principales degradadores de lignina. Existen informes de bacterias ligninolíticas que poseen mecanismos de enzimas extracelulares y metabolitos secundarios capaces de actuar sobre este polímero, en particular las clases: α -Proteobacteria, γ -Proteobacteria y Actinomicetos, son consideradas los principales descomponedores de lignocelulosas en el suelo (2000; Huang *et al.*, 2013; Saini *et al.*, 2015). Este trabajo explora el reservorio de diversidad bacteriana ligninolítica en la

rizosfera de especies de *Quercus spp.* con el fin de asilar y describir morfológicamente cepas bacterianas degradadoras de lignina además de adecuar métodos de extracción de este biopolímero biológicamente activo. Así mismo, poder comparar la eficiencia selectiva de la lignina nativa contra la comercial como fuentes de carbono en medios de cultivo, se planteó la siguiente hipótesis: El adecuar medios de cultivo con lignina nativa del bosque de *Quercus*, se promueve una mayor representatividad de las comunidades bacterianas ligninolíticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras utilizadas fueron recolectadas en Santiago Tilantongo, Oaxaca, en la RTP 125 Cerros Negro-Yucaño, localizada al noreste del estado Oaxaca, con una extensión de 1 274 km² y una altitud entre 1300 y 3200 msnm, con clima predominante templado (Cw1), y grandes extensiones de bosques conservados, mayoritariamente de *Quercus*, *Pinnus* y bosques mixtos. Región que destaca por su importancia ecológica y social al conservar la biodiversidad y brindar soporte económico a las comunidades rurales.

Esta investigación se realizó en tres fases metodológicas; 1) La extracción y elucidación estructural de la lignina radical de *Quercus spp.*, 2) El aislamiento y descripción de cepas; y 3) La evaluación en la eficiencia de los medios de cultivo selectivos. Los muestreos, tanto para la extracción de lignina como para el cultivo de microorganismos, se realizaron en dos sitios, escogiendo 3 individuos sanos por sitio con (DAP de 40-70 cm y altura de 10-20 m.), ubicados en las siguientes coordenadas; Sitio 1, 17°23'08" N 97°34'46" O 2400 msnm, y Sitio 2, 17°24'94" N 97°34'69" O 2809 msnm.

Para los muestreos de extracción de lignina se utilizó 50g de tejido radical colectado, a 2 m de distancia de la base de cada árbol y a una profundidad de 10-30 cm de la superficie del suelo. Las muestras se procesaron de acuerdo a la adaptación del método descrito por García (2019) y Xu *et al.* (2006) para la extracción de lignina Organosolv. Tras el aislamiento de este polímero se procedió a comprobar y describir su estructura usando técnicas físicas no destructivas; Espectrofotometría UV-vis (espectrofotómetro DLAB modelos SP-Uv100, con lecturas de 200-500 nm), Espectrofotometría RNM (Equipo RMN Jeol de 600 MHz a 600 MHz para RMN de ¹H, DEPTQ, HSQC y HMBC).

Para el muestreo de microorganismos, a 2 m de la base de cada árbol y de 10-50 cm de profundidad, se recogieron 100 g entre raíces absorbentes y suelo rizosférico. Siguiendo el protocolo de Murotova *et al.* (2003), se hicieron enjuagues con agua destilada y agitación constante, para en seguida realizar diluciones seriadas hasta 10⁻⁷. Utilizando

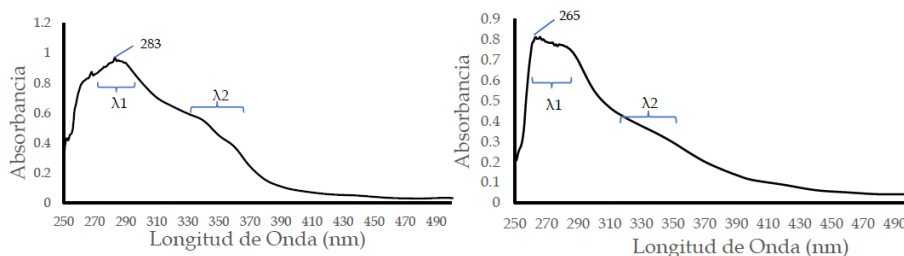
medio líquido MSM, se realizaron 3 líneas de cultivo correspondientes a: MSM adicionado con lignina Organosolv (MSM-LO), MSM adicionado con lignina Kraft comercial de grado reactivo de la marca Sigma-Aldrich (MSM-LC) y el MSM control sin adición de fuentes carbono (MSM-C). Para las tres líneas de cultivo se realizó el siguiente esquema: a). cultivo en los medios líquidos incubados durante 7 días a 37°C con agitación constante en las primeras 48 h, b). cultivo por rastrilleo en medio sólido incubado a 30°C durante 48 h iniciando cultivos simultáneos en Agar nutritivo, c). selección de cepas de este último medio, para ser resembradas hasta su purificación en MSM-LC y Agar nutritivo. Para visualizar el crecimiento entre los dos medios sólidos se realizó el conteo de colonias 48 h después del enriquecimiento con medio líquido utilizando el software IMAGE J.

Para los experimentos de degradación, se seleccionaron los aislamientos bacterianos que tuvieron un crecimiento rápido y abundante en las placas de MSM-LC, los cuales se realizaron en medios líquidos MSM-LC y MSM-LO adicionados con 0.125 mg/mL de azul anilina. Midiendo la degradación del indicador por espectrofotometría UV-vs, del medio sin inocular y después de 7 días de incubación a 30°C con agitaciones diarias.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La extracción y caracterización de la lignina Organosolv a partir de raíces de *Quercus spp.* reveló diferencias estructurales frente a la lignina Kraft comercial, mostrando en el espectro UV-vis, un desplazamiento del pico máximo de 283 nm a 265 nm, indicado en diversos registros como una mayor proporción de unidades guaiacil-siringilo (Sun y Tomkinson 2001, Zhang *et al.*, 2010) (Figura 1,2). Mientras que en los espectros RMN se observa una mayor diversidad de cadena lateral en los datos correspondientes a lignina Organosolv, con respecto a una mayor diversidad de señales de subunidades en la lignina comercial. En particular las señales de enlaces β -O-4 tuvieron mayor presencia en lignina Organosolv que en lignina Kraft, lo que concuerda con los registros de abundancia en maderas duras y la ausencia en herbáceas (Katahira *et al.*, 2018), este último grupo señalado como posible fuente del material de origen de la lignina comercial. Además, se observó una mayor diversidad de benzaldehídos en la lignina Kraft comercial, así como la presencia algunas señales aisladas de grupos fenilcumarato, en contraste, en la lignina Organosolv fueron registradas señales de resinol y fenilcumarato, lo anterior sugiere una mayor disposición de degradación en la lignina Kraft (Heitner *et al.*, 2016). Por último, se registró la presencia de fragmentos xilano en la lignina Organosolv relacionados con complejos lignina carbohidrato, cuya fuerte unión reduce la accesibilidad enzimática (Nhuchhen *et al.*, 2014; Tarasov *et al.*, 2018).

Figura 1. Perfiles de espectrofotometría UV/vis correspondientes; de lado izquierdo Lignina Kraft comercial, lado derecho Lignina nativa Organosolv.



El conteo de colonias de los medios sólidos, antes a su asilamiento y purificación, indicó mayor proporción en la línea MSM-LO (45.67%), seguida por la línea MSM-C (31.9%) y la MSM-LC (22.42%). Sin embargo, existieron diferencias notables en la forma y dinámica de las colonias obtenidas en las líneas MSM-LC y MSM-C, se observaron colonias grandes e irregulares con un crecimiento empalmado, indicador de medios con alta disponibilidad de nutrimentos que favorecen el crecimiento de especies copiotróficas (Prescott *et al.*, 2005). En contraste la línea MSM-LO presentó numerosas colonias individuales y puntiformes, congruente con el crecimiento de especies oligotróficas en medios selectivos e indicativo de un crecimiento lento con limitaciones nutrimentales o la adaptación de condiciones específicas (Madigan *et al.*, 2022). Así, se optó por descartar el uso de UFC.

Se obtuvo un total de 54 aislamientos purificados, los cuales fueron descritos morfológicamente, incluyendo pruebas químicas básicas y tinciones. Del total, 42 aislamientos reportaron un crecimiento positivo, durante las primeras 48 h de incubación, en medios diferenciales. Las proporciones por línea de cultivo fueron las siguientes; MSM-C 66.7% (28 aislamientos), MSM-LO 16.67% (7 aislamientos) y MSM-LO 16.67% (7 aislamientos). Para las pruebas de degradación fueron seleccionados 8 aislamientos con características correspondientes a Actinomicetos, de origen en la línea MSM-LO, 15 aislamientos con características de bacterias de los cuales 4 correspondieron a la línea MSM-LC y 11 a la línea MSM-C. Los resultados en las pruebas de degradación del colorante azul anilina fueron normalizados, para obtener un porcentaje de cambio absoluto, con el fin de agrupar y comparar los datos obtenidos. Los aislamientos bacterianos de las líneas MSM-LC y MSM-C presentaron en ambos casos un rango menos variable en la degradación de lignina Organosolv, observado como cajas más compactas en el bloxplot, (Figura 2), sugiriendo una mayor consistencia en sus dinámicas de degradación, caso contrario en los datos de degradación de Lignina Kraft comercial en los cuales se observa una mayor dispersión en los datos. Los aislamientos de Actinomicetos, reportaron cambios

bruscos en el colorante, lo que dificultó su comparación, se observó una mayor dispersión de los datos para la degradación de lignina Organosolv, con algunos aislamientos con porcentajes de cambio demasiado elevados, mientras que para la degradación de Lignina Kraft comercial, un alto porcentaje mostró mayor afinidad al ser cultivados previamente en medios enriquecidos con esta lignina, observándose una mayor consistencia en su degradación (Figura 3).

Figura 2. Comparación del cambio absoluto en la degradación de lignina en bacterias inducido por lignina natural y comercial y línea cultivo de origen.

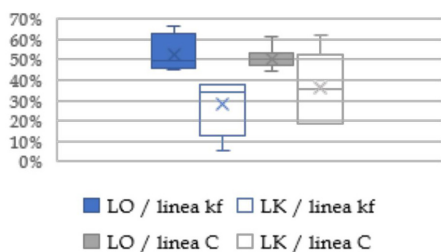
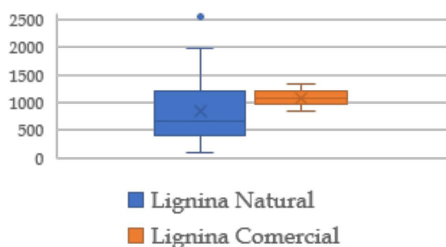


Figura 3. Comparación del cambio absoluto en la degradación de lignina en bacterias inducido por lignina natural y comercial y línea cultivo de origen.



4. CONCLUSIONES

Los medios enriquecidos con lignina nativa (Lignina Organosolv de *Quercus spp.*), permiten aislar y describir de manera complementaria la diversidad de comunidades bacterianas ligninolíticas (cultivables en laboratorio) dentro de la rizosfera, lo que valida de manera parcial la hipótesis propuesta, el total de aislamientos obtenidos ayuda a demostrar la eficacia del protocolo de extracción Organosolv para obtener lignina biológicamente activa, a su vez el hallazgo de los aislamientos propuestos como actinomicetos, con una mayor capacidad de degradación, es indicativo de la eficiencia de este polímero como fuente de carbono en medios selectivos, abriendo perspectivas para su aplicación biotecnológica.

BIBLIOGRAFÍA

- García J. A. (2019). Determinación de actividad antioxidante en lignina obtenida de residuos agrícolas [Tesis de licenciatura]. Universidad de Sonora.
- Heitner C., Dimmel D. y Schmidt J. (Eds.). (2016). Lignin and lignans: Advances in chemistry. CRC Press.
- Huang X. F., Santhanam N., Badri D. V., Hunter W. J., Manter D. K., Decker S. R., Vivanco J. M. y Reardon K. F. (2013). Isolation and characterization of lignin-degrading bacteria from rainforest soils. *Biotechnology and Bioengineering*, 110(6), 1616–1626. <https://doi.org/10.1002/bit.24833>

Katahira R., Elder T. J. y Beckham G. T. (2018). A brief introduction to lignin structure. En *Lignin valorization* (pp. 1–20). Royal Society of Chemistry.

Madigan M.T., Bender K. S., Buckley D. H., Sattley W.M. & Stahl D. A. (2022). *Brock Biology of Microorganisms* (16th ed.). Pearson.

Montoya Franco M. L. y Muñoz Herrera G. A. (2014). Degradación de lignina en lodos provenientes de la industria papelera mediante el empleo del *Ganoderma lucidum* [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de Pereira.

Muratova A., Hubner T., Tischer S., Turkovskaya O., Moder M. y Kuschik P. (2003). Plant–rhizosphere-microflora association during phytoremediation of PAH-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 5(2), 137–151. <https://doi.org/10.1080/713610176>

Nhuchhen D. R., Basu P. y Acharya B. (2014). A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy and Biofuels*, 2014, 1–56. <https://doi.org/10.5171/2014.506376>

Ortiz M. L. (2009). Aproximaciones a la comprensión de la degradación de la lignina. *Orinoguia*, 13(2), 137–144.

Saini A., Aggarwal N. K., Sharma A. y Yadav A. (2015). Actinomycetes: A source of lignocellulolytic enzymes. *Enzyme Research*, 2015, 279381. <https://doi.org/10.1155/2015/279381>

Prescott L. M., Harley J. P., & Klein D. A. (2005). *Microbiología* (6ª ed.). McGraw-Hill.

Sun R. y Tomkinson J. (2001). Comparative study of lignins isolated by alkali and ultrasound-assisted alkali extractions from wheat straw. *Ultrasonics Sonochemistry*, 9(2), 85–93. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(01\)00106-7](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00106-7)

Tarasov D., Leitch M. y Fatehi P. (2018). Lignin-carbohydrate complexes: Properties, applications, analyses, and methods of extraction: A review. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 269. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1262-1>

Xu F., Sun J. X., Sun R., Fowler P. y Baird M. S. (2006). Comparative study of organosolv lignins from wheat straw. *Industrial Crops and Products*, 23(2), 180–193. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.05.008>

Yaovapa T., Toru J., Yoshimasa M., Shigeharu M., Savitt T., Navavarn N., Moriya O. y Toshiaki K. (2005). Symbiotic fungi produce laccases potentially involved in phenol degradation in fungus combs of fungus-growing termites in Thailand. *Journal of General and Applied Microbiology*, 51(1), 1–9. <https://doi.org/10.2323/jgam.51.1>

Zhang L., Gellerstedt G. y Ralph J. (2010). NMR studies on the occurrence of spirodienone structures in lignins. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 30(1), 61–75. <https://doi.org/10.1080/02773810903419217>

CAPÍTULO 7

PHYTOGENETIC RESOURCES OF THE GENUS *Lupinus* IN BAJA CALIFORNIA: EXPLORATION AND *in situ* CHARACTERIZATION STRATEGIES

Data de submissão: 01/09/2026

Data de aceite: 16/09/2026

Guadalupe Minerva Torres Alfaro¹

Centro Interdisciplinario de
Ciencias Marinas
Instituto Politécnico Nacional
La Paz, Baja California Sur, México
<https://orcid.org/0000-0002-9183-9834>

María Nancy Herrera-Moreno

Centro Interdisciplinario de
Investigación para el Desarrollo
Integral Regional
Instituto Politécnico Nacional
Unidad Sinaloa, México
<https://orcid.org/0000-0001-5390-8432>

Jesús Alicia Chávez-Medina

Centro Interdisciplinario de
Investigación para el Desarrollo
Integral Regional
Instituto Politécnico Nacional
Unidad Sinaloa, México
<http://orcid.org/0000-0002-8552-2590>

Kalina Bermúdez Torres

Centro de Desarrollo de
Productos Bióticos
Instituto Politécnico Nacional
Yauatepec, Morelos, México
<https://orcid.org/0000-0002-7267-7657>

ABSTRACT: A comprehensive field expedition was conducted across the Baja California Peninsula from April 26 to May 5, 2023, to locate, document, and collect germplasm of wild *Lupinus* species. This expedition was critical for updating the knowledge of *Lupinus* diversity in this biogeographically significant region, as previous systematic collections date back several decades, with most herbarium specimens collected between the 1960s and 1980s. The expedition covered approximately 2,100 kilometers in a circular route starting and ending in La Paz (23°37'N, 109°52'W). The itinerary followed a strategic north-south gradient, beginning in Sierra La Laguna at 789 msnm elevation, proceeding northward through coastal zones (12-73 msnm) near Mulegé and Guerrero Negro (27°37'N-28°57'N), ascending to mid-elevation sites around Loreto and San Ignacio (532-1,078 msnm at 29°24'N-31°27'N), reaching the highest elevations in the Sierra San Pedro Mártir region (1,504-2,628 msnm at 31°02'N-32°10'N), and returning south through the central peninsula (435-1,773 msnm) before completing the circuit back to La Paz. The research team, consisting of four ladies (Minerva, Nancy, Alicia, and Kalina), successfully documented 36 populations and collected 31 accessions representing 10 distinct *Lupinus* species. The collection prioritized *in situ* morphological identification, recording of geographic coordinates, and seed collection for subsequent studies and germplasm conservation. Identification was performed by comparison with type specimens

¹ Corresponding author

and confirmation with the original description. The altitude range where *Lupinus* species were found varied from 12 msnm to 2621 msnm. The species collected were: *Lupinus affinis*, *L. andersonii*, *L. arizonicus*, *L. bicolor*, *L. concinnus*, *L. excubitus*, *L. hirsutissimus*, *L. latifolius*, *L. niveus*, and *L. saxosus*. Furthermore, *L. excubitus* showed the greatest altitudinal range (532 - 2680 msnm), and *L. arizonicus* showed the greatest ecological versatility by being present from above sea level to submontane elevations. Annual species (*L. affinis*, *L. andersonii*, *L. arizonicus*, *L. bicolor*, *L. concinnus*, *L. hirsutissimus*) have short life cycles (3–5 months) and germinate with the first winter rains. Perennial species (*L. excubitus*, *L. latifolius*, *L. niveus*, *L. saxosus*) develop persistent woody structures that allow them to survive adverse conditions. *L. hirsutissimus* is easily distinguished by its dense hairs and large, leaf-like floral bracts. According to the ecoregions of González-Abraham et al. (2010) and our field notes, *L. hirsutissimus*, the most frequent species in the northern part of the peninsula, occupies three different ecoregions: coastal scrubland towards the Pacific Ocean and the San Felipe Desert and Central Desert towards the Gulf of California. The only species found in both the north and the south was *L. niveus*. In the north, it occupies the Rosetophyllous Coastal Scrub region, and in the south, the Cape Lowland Forest. This expedition represents a significant contribution to the understanding of *Lupinus* diversity in the Baja California Peninsula, providing valuable germplasm for conservation and breeding programs. This work establishes a foundation for continued biodiversity assessment and conservation strategies for wild lupins in northwestern Mexico. The collected material is available for public consultation by contacting the authors.

KEYWORDS: biodiversity and biological monitoring; collected material available; conservation and protection of species; ecosystem assessment.

1. INTRODUCTION

The genus *Lupinus* is one of the most complex within the Fabaceae family. Depending on the author, between 200 and more than 500 species have been recognized. Although the genus appears to have originated in the Mediterranean region, it underwent an extraordinary evolutionary radiation in the Americas, particularly in western North America and the Andes (Bermudez-Torres et al., 2021). Due to their high protein content, these plants were domesticated by major civilizations, including the Egyptians, Greeks, Romans, and Incas. However, species within this genus are multipurpose plants with diverse potential applications. Thanks to their association with nitrogen-fixing bacteria, they have been used to improve soil quality. Furthermore, plants of this genus synthesize quinolizidine alkaloids as a defense strategy against predators, making them potential sources of biologically active compounds. They also contain a wide variety of compounds with diverse biological activities, such as flavonoids, phenolic compounds, and bioactive peptides. The flora of the Baja California Peninsula shares a recent evolutionary origin with that of the southwestern United States and differs significantly from the flora of the mainland (Stebbins and Major, 1965; Dolby et al., 2015).

2. OBJECTIVE

To locate, document, and collect germplasm of wild *Lupinus* species across the Baja California Peninsula, Mexico.

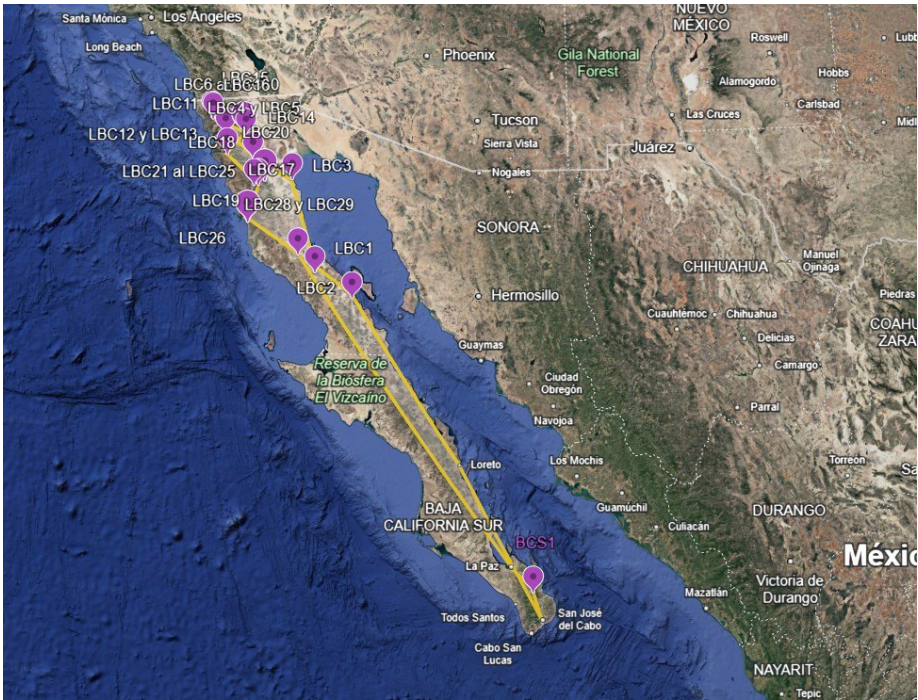
3. MATERIALS AND METHODS

An extensive vehicle-based survey was conducted across the Baja California Peninsula. Specimens were collected manually, prioritizing *in situ* morphological identification, the recording of geographic coordinates, and seed collection for subsequent studies and germplasm conservation. Final identification involved comparisons with type specimens and verification against the original description.

4. RESULTS

Thirty-six populations were documented, and 31 accessions representing 10 different species were collected (Figure 1).

Figure 1. Map of locations where the different *Lupinus* species were found during the field expedition conducted across the Baja California Peninsula from April 26 to May 5, 2023. Thirty of the thirty-one occurrences were recorded in the state of Baja California Norte.



The elevation at the collection sites ranged from 12 to 2,621 meters above sea level. *L. niveus* was the only species found in both the north and the south. The greatest ecological versatility was observed in *L. arizonicus*, which was present from sea level up to submontane elevations. Of the 10 species found, only *L. niveus* is considered endemic to the Baja California Peninsula (Table 1).

Table 1. Endemism of *Lupinus* species found during the field expedition conducted across the Baja California Peninsula from April 26 to May 5, 2023.

Species	Endemic to the Baja California Peninsula?
<i>Lupinus affinis</i>	No. Distributed in California and other areas of western North America.
<i>Lupinus andersonii</i>	No. Endemic to California/Nevada, not the peninsula.
<i>Lupinus arizonicus</i>	No. Present in Arizona, California, and northwestern Mexico.
<i>Lupinus bicolor</i>	No. Wide distribution in western North America.
<i>Lupinus concinnus</i>	No. California, Nevada, Arizona, and Baja California.
<i>Lupinus excubitus</i>	No. Endemic to California.
<i>Lupinus hirsutissimus</i>	No. California and Baja California.
<i>Lupinus niveus</i> (S. Watson, 1876)	Yes. Endemic to the Baja California Peninsula. (enciclovida.mx)
<i>Lupinus saxosus</i>	No. Taxon from California and other areas of western North America; currently treated as <i>Lupinus polyphyllus</i> var. <i>saxosus</i> .

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

This study lays the groundwork for the ongoing assessment of biodiversity and conservation strategies for wild lupines in northwestern Mexico. The specie *Lupinus niveus* would be an example of neoendemism, resulting from geographic isolation and adaptation to specific environments (Stebbins and Major, 1965). Its endemism could be interpreted as a consequence of historical processes associated with the separation of the Baja California Peninsula, the opening of the Gulf of California, and the existence of regional climate refugia (Dolby *et al.*, 2015).

REFERENCES

Bermudez-Torres, K., Ferval, M., Hernandez-Sanchez, A. M., Tei, A., Gers, C., Wink, M., & Legal, L. (2021). Molecular and chemical markers to illustrate the complex diversity of the genus *Lupinus* (Fabaceae). *Diversity*, 13(6), 263.

Dolby, G. A., Bennett, S. E., Lira-Noriega, A., Wilder, B. T., & Munguía-Vega, A. (2015). Assessing the geological and climatic forcing of biodiversity and evolution surrounding the Gulf of California. *Journal of the Southwest*, 57(2), 391-455.

Stebbins, G. L., & Major, J. (1965). Endemism and speciation in the California flora. *Ecological monographs*, 35(1), 2-35.

ENCICLOVIDA. MX. CONABIO. *Lupinus niveus*. <https://enciclovida.mx/especies/187507-lupinus-niveus> consulta 09/09/2026.

CAPÍTULO 8

MICROORGANISMOS BENEFICIOSOS COMO ESTRATEGIA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN MINERAL EN EL CULTIVO DE ARROZ EN UN SUELO DE BAJA OFERTA NUTRICIONAL

Data de submissão: 09/09/2026

Data de aceite: 21/09/2026

Eliecer Miguel Cabrales Herrera

PhD. Universidad de Córdoba

Docente Titular e Investigador

Carrera 6 No. 77- 305

Montería – Córdoba, Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-6564-1664>

RESUMEN: El uso intensivo de fertilizantes minerales en el cultivo de arroz constituye un desafío para la sostenibilidad de los agroecosistemas, particularmente en suelos tropicales de baja fertilidad y limitada disponibilidad de nutrientes. En este contexto, se evaluó el efecto de microorganismos beneficiosos como estrategia complementaria para reducir la dependencia de la fertilización mineral en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en un suelo de baja oferta nutricional del Caribe colombiano. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con siete tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos T1–T5 correspondieron a 0, 25, 50, 75 y 100 % de la dosis de NPK, respectivamente, todos complementados con 20 L ha⁻¹ de un

biofertilizante constituido por microorganismos beneficiosos nativos. Además, se incluyeron un tratamiento con T6 (100 % de NPK sin biofertilizante) y T7 (control sin fertilización). Se evaluaron componentes del rendimiento, peso de 1000 granos y rendimiento de grano, así como indicadores económicos. Los componentes del rendimiento presentaron una respuesta relativamente estable frente al gradiente de fertilización mineral cuando esta se aplicó conjuntamente con el biofertilizante. El rendimiento mostró un incremento marcado entre 0 y 25 % de NPK, seguido de una respuesta de tipo meseta; T2 alcanzó 4.547,9 kg ha⁻¹, estadísticamente similar a T3, T4 y T5, que registraron 4.618,3, 4.615,4 y 4.625,4 kg ha⁻¹, respectivamente. El análisis económico identificó T2 como la alternativa de mayor eficiencia, con una utilidad de \$2.361.156 ha⁻¹ y una relación beneficio/costo de 1,50. Los resultados sugieren que la incorporación de microorganismos beneficiosos puede contribuir a mantener la productividad del arroz con una reducción sustancial de la fertilización mineral, bajo las condiciones edafoclimáticas y de manejo evaluadas. Se concluye que el manejo integrado de la nutrición constituye una alternativa promisorio para disminuir la dependencia de fertilizantes minerales en sistemas arroceros del Caribe colombiano.

PALABRAS CLAVE: arroz; biofertilizantes; microorganismos beneficiosos; NPK; nutrición vegetal; eficiencia de fertilización; sostenibilidad.

BENEFICIAL MICROORGANISMS AS A STRATEGY TO ENHANCE MINERAL FERTILIZATION EFFICIENCY IN RICE GROWN IN LOW-NUTRIENT SOIL

ABSTRACT: The intensive use of mineral fertilizers in rice production represents a challenge for agroecosystem sustainability, particularly in tropical soils with low fertility and limited nutrient availability. This study evaluated the effect of beneficial microorganisms as a complementary strategy to reduce dependence on mineral fertilization in rice (*Oryza sativa* L.) grown on a soil with low nutrient supply in the Colombian Caribbean. A randomized complete block design was established with seven treatments and three replications. Treatments T1-T5 received 0, 25, 50, 75 and 100% of the recommended NPK rate, respectively, all supplemented with 20 L ha⁻¹ of a biofertilizer containing native beneficial microorganisms. In addition, a treatment receiving 100% NPK without biofertilizer and an unfertilized control were included. Yield components, 1000-grain weight, grain yield and economic indicators were evaluated. Yield components showed a relatively stable response to the mineral fertilization gradient when applied in combination with the biofertilizer. Grain yield increased markedly from 0 to 25% NPK and subsequently showed a plateau-type response. Treatment T2 reached 4,547.9 kg ha⁻¹, statistically similar to T3, T4 and T5, which produced 4,618.3, 4,615.4 and 4,625.4 kg ha⁻¹, respectively. Economic analysis identified T2 as the most efficient alternative, with a net utility of COP 2,361,156 ha⁻¹ and a benefit-cost ratio of 1.50. These results suggest that beneficial microorganisms may contribute to maintaining rice productivity while substantially reducing mineral fertilizer inputs under the edaphoclimatic and management conditions evaluated. Integrated nutrient management therefore represents a promising strategy to reduce dependence on mineral fertilizers in rice production systems in the Colombian Caribbean.

KEYWORDS: rice; biofertilizers; beneficial microorganisms; NPK; plant nutrition; fertilizer efficiency; sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) constituye uno de los principales cereales destinados a la alimentación humana y desempeña un papel estratégico en la seguridad alimentaria y en la economía de numerosos países tropicales. En Colombia, su producción se desarrolla bajo diferentes condiciones agroecológicas y sistemas de manejo, entre ellos el riego y el secano mecanizado. En el Caribe colombiano, particularmente en Córdoba, el cultivo presenta una importante participación dentro de los sistemas agrícolas regionales, donde la productividad está estrechamente relacionada con la distribución de las precipitaciones, las características del suelo y el manejo de la fertilización. La información sectorial de Fedearroz evidencia la importancia de esta región dentro de la producción arrocería nacional (Fedearroz, 2026).

En los sistemas de arroz de secano favorecido, la disponibilidad de agua y nutrientes durante el ciclo constituye un factor determinante; su aprovechamiento productivo depende también de la capacidad del suelo para suministrar los nutrientes

requeridos por la planta. El nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K) participan en procesos metabólicos, estructurales y fisiológicos fundamentales para el crecimiento y la formación del grano en el cultivo de arroz. El N interviene en la síntesis de proteínas, clorofila y enzimas; el P participa en la transferencia de energía, el desarrollo radical y diferentes procesos metabólicos, mientras que el K interviene en la regulación osmótica, la actividad enzimática y el transporte de fotoasimilados (Du et al., 2021; Ma et al., 2022). Esto es, una disponibilidad insuficiente o un suministro desequilibrado de estos nutrientes puede limitar la acumulación de biomasa y afectar la formación de los componentes del rendimiento en los cultivos.

La respuesta del cultivo a la fertilización depende no solo de la cantidad de nutrientes aplicados, sino, de la eficiencia con la que el arroz toma y utiliza los elementos incorporados en una interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, las condiciones climáticas, el manejo del agua, el genotipo y la sincronización entre la oferta nutricional y la demanda del cultivo, es decir que la evaluación debe hacer de manera integral. Esta apreciación adquiere especial relevancia en suelos de baja oferta nutricional, donde contenidos reducidos de materia orgánica, baja disponibilidad de P, escasas reservas de bases intercambiables y otras restricciones químicas pueden limitar la productividad aun cuando la disponibilidad hídrica sea favorable.

La fertilización mineral constituye, en estas condiciones, una herramienta fundamental para corregir deficiencias y mantener la productividad. Pero su efectividad no guarda proporcionalidad con las dosis aplicadas, ya que una fracción del N se puede perder mediante volatilización, lixiviación, desnitrificación o escorrentía, mientras que el P puede quedar retenido o formar compuestos inaprovechables para la planta, y el K puede experimentar procesos de fijación o lixiviación, entre otros. Por esta razón, incrementar la eficiencia de uso de los nutrientes constituye uno de los principales desafíos de la agricultura contemporánea. En arroz, estrategias orientadas a mejorar la distribución y disponibilidad del N en la zona radical han demostrado que es posible incrementar simultáneamente la absorción del nutriente, el crecimiento radical y el rendimiento, resaltando la importancia de la forma y oportunidad de suministro además de la dosis aplicada (Liu et al., 2024).

Esta problemática adquiere mayor importancia cuando la fertilización mineral constituye la principal estrategia para compensar una baja oferta natural de nutrientes. Una reducción excesiva de las dosis puede ocasionar disminuciones del crecimiento y rendimiento; y mantener niveles elevados de fertilización tampoco garantiza una respuesta productiva proporcional. El desafío agronómico consiste, no solo en aplicar menores cantidades de fertilizante, sino en aumentar la proporción de nutrientes que

permanece disponible y que sea efectivamente aprovechada por la planta. En este sentido, Coggins et al. (2025) señalaron la existencia de oportunidades para mejorar la eficiencia del N en sistemas arroceros mediante un manejo más racional de las aplicaciones de los fertilizantes.

Una alternativa para avanzar en esta dirección consiste en incorporar procesos biológicos al manejo de la fertilidad. Los microorganismos beneficiosos asociados al suelo y a la rizosfera pueden participar en procesos relacionados con la fijación biológica de N, solubilización o movilización de P y otros nutrientes, producción de sustancias promotoras del crecimiento y modificación de las condiciones de la rizosfera. Asimismo, determinados grupos microbianos participan en la descomposición de residuos y en la transformación de nutrientes contenidos en compuestos orgánicos. Estas funciones permiten plantear que la actividad microbiana puede mejorar el aprovechamiento de nutrientes presentes en el suelo y los que se aplican en los planes de fertilización (Timofeeva et al., 2023).

La evidencia experimental respalda el potencial de la biofertilización, pero también demuestra que su respuesta depende del ambiente. Un metaanálisis global encontró efectos positivos de la biofertilización sobre el rendimiento y la eficiencia de uso de N y P, con respuestas variables según clima, propiedades del suelo y grupo microbiano utilizado (Schütz et al., 2018). Más recientemente, estudios en arroz han encontrado respuestas favorables cuando determinados microorganismos se combinan con reducciones parciales de fertilización mineral. Li et al. (2024), por ejemplo, observaron cambios favorables en la disponibilidad de N y P y en las comunidades microbianas de la rizosfera tras la inoculación de una bacteria fijadora de N. Muthukrishnan et al. (2024) también encontraron respuestas favorables al combinar microorganismos con fertilización mineral reducida.

El interés actual se orienta cada vez más hacia estrategias de manejo integrado de nutrientes, en las cuales los fertilizantes minerales proporcionan nutrientes disponibles de manera relativamente inmediata, mientras que los componentes biológicos pueden contribuir a mejorar su movilización, adquisición y utilización. Este enfoque no implica considerar los microorganismos como sustitutos absolutos de N, P y K, sino como un componente complementario dentro del sistema de nutrición vegetal. La efectividad de esta estrategia dependerá de las características del suelo, la composición microbiana, el cultivar, el manejo y las condiciones ambientales.

Esta problemática resulta particularmente pertinente para los sistemas arroceros del Caribe colombiano, donde pueden coexistir suelos de baja oferta nutricional y una marcada dependencia de la fertilización mineral externa y extrema. Resulta necesario establecer si una reducción significativa de NPK, acompañada por una dosis constante

de microorganismos beneficiosos, permite mantener la productividad del arroz sin comprometer la formación de sus principales componentes de rendimiento.

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de cinco niveles de fertilización mineral NPK (0, 25, 50, 75 y 100 % de la dosis total) combinados con 20 L ha⁻¹ de un biofertilizante nativo constituido por microorganismos beneficiosos (siete tratamientos en total), sobre el comportamiento productivo del arroz bajo condiciones de secano favorecido en un suelo de baja oferta nutricional del Caribe colombiano. La dosis correspondiente al 100 % estuvo constituida por 150 kg N, 80 kg P y 120 kg K ha⁻¹. Se planteó como hipótesis que la incorporación de microorganismos beneficiosos podría mejorar el aprovechamiento de los nutrientes disponibles y permitir una reducción parcial de la fertilización mineral sin afectar significativamente la productividad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El estudio se realizó en la Finca La Ilusión, corregimiento Buenos Aires, municipio de Montería, Córdoba, Colombia. La zona presenta clima cálido, precipitación anual entre 1500 y 2000 mm, temperatura media de 27,5 °C y altitud aproximada de 150 m s. n. m.; de acuerdo con la clasificación de Holdridge corresponde a una zona de transición entre bosque húmedo y bosque seco (MADR, 2006). El terreno presentó topografía plana, pendiente inferior al 2 %, nivel freático profundo y ausencia de erosión evidente.

El suelo presentó textura franca, con 43,9 % de arena, 31,7 % de limo y 24,4 % de arcilla. El pH fue de 4,62, con 1,2 % de materia orgánica, 1,2 mg kg⁻¹ de P, 1,01 cmol(+) kg⁻¹ de Ca, 0,47 cmol(+) kg⁻¹ de Mg y 0,12 cmol(+) kg⁻¹ de K, condiciones que caracterizan un suelo de baja oferta nutricional.

2.2. TRATAMIENTOS Y BIOFERTILIZANTE

Se evaluaron siete tratamientos bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los tratamientos T1-T5 recibieron 20 L ha⁻¹ del biofertilizante, combinado con 0, 25, 50, 75 y 100 % de la dosis total de NPK, respectivamente. T6 recibió 100 % de NPK sin biofertilizante y T7 no recibió fertilización mineral ni biofertilizante.

La dosis completa correspondió a 150 kg N, 80 kg P y 120 kg K ha⁻¹, suministrados mediante urea, DAP y KCl. La contribución de N procedente del DAP fue considerada en el cálculo de la dosis total de N.

El biofertilizante estuvo constituido por una suspensión de microorganismos beneficiosos nativos, cuya extracción y multiplicación se realizaron localmente. La caracterización microbiológica disponible correspondió a hongos y bacterias totales, con poblaciones de 3×10^5 y $3,5 \times 10^9$ UFC, respectivamente. La aplicación fue fraccionada en dos momentos, a los 15 y 35 días después de la emergencia, mediante aplicaciones foliares y edáficas de 10 L ha^{-1} en cada oportunidad.

2.3. ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DEL CULTIVO

Se realizó preparación convencional del suelo mediante dos pases de rastra pesada y uno de rastra liviana. Se utilizó arroz FEDEARROZ 70, sembrado manualmente en hileras separadas 25 cm, con cinco sitios por metro lineal y entre tres y cinco semillas por sitio.

La fertilización mineral se fraccionó en tres aplicaciones, a los 15, 25 y 35 días después de la emergencia, correspondientes al 20, 30 y 50 % de la dosis calculada para cada tratamiento. Se aplicó además una fuente comercial de micronutrientes y elementos secundarios a razón de 1 L ha^{-1} . El manejo de arvenses se realizó con propanil a 5 L ha^{-1} y el control de plagas mediante cipermetrina a 400 mL ha^{-1} . No fue necesario efectuar control de enfermedades.

La cosecha se realizó manualmente en 1 m^2 ubicado en el centro de cada unidad experimental, cuando el grano alcanzó la madurez fisiológica.

2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos fueron analizados mediante ANOVA utilizando SAS versión 9.4, previa comprobación de los supuestos del análisis. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5 %. Se evaluaron densidad de población final, número de espiguillas por panícula, número de granos por panícula, granos llenos, granos vanos, porcentaje de granos vanos, peso de 1000 granos y rendimiento de grano paddy.

Los tratamientos T6 y T7 no fueron incluidos en el análisis estadístico de las variables finales debido a que no alcanzaron la cosecha, por ende el rendimiento fue nulo. A partir de los 70 días de siembra, se presentó una sequía prolongada y el aunque se hizo riego, este no fue suficiente para que estos dos tratamientos permanecieran hasta el final de cosecha. Su comportamiento se presenta únicamente como observación complementaria del ensayo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DENSIDAD DE POBLACIÓN FINAL

La densidad de población final varió entre $1,52 \times 10^6$ y $2,60 \times 10^6$ plantas ha^{-1} en T1 y T5, respectivamente. El ANOVA detectó diferencias entre tratamientos y la prueba de Tukey mostró que T5 presentó una densidad significativamente superior a T1, mientras que T2, T3 y T4 ocuparon posiciones intermedias (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de media de densidad de población y características de panícula y granos de arroz con distintas dosis de fertilización química y biofertilizado con microorganismos benéficos.

TTO	DENSIDAD DE POBLACION 10^6	PANICULA		NUMERO GRANOS		GRANOS VANOS (%)	Peso 1000 granos (g)
		NÚMERO ESPIGUILLAS	NUMERO DE GRANOS	LLENOS	VANOS		
1	1,52 b	13,33	126,66 a	63,00 a	63,66 a	50,26 a	23,17 a
2	2,49 ab	13,33	145,99 a	75,33 a	70,66 a	48,40 a	23,47 a
3	2,4 ab	13,33	149,42 a	76,66 a	72,66 a	48,66 a	24,54 a
4	2,36 ab	14,66	126,66 a	84,33 a	42,33 a	33,42 a	24,39 a
5	2,6 a	15,33	130,33 a	88,00 a	42,33 a	32,48 a	24,73 a
CV (%)	15,71	14,77	7,58	12,45	25,81	19,49	10,24

El incremento de la población final con mayores dosis de NPK puede relacionarse con una mayor disponibilidad de nutrientes durante las primeras etapas del cultivo, particularmente N, cuya participación en el crecimiento vegetativo y desarrollo de macollas puede modificar la estructura de la población. Tian et al. (2017) señalaron que la relación entre disponibilidad de N y densidad de plantas influye en la productividad de la población arroceras, por lo tanto es un factor importante a tener en cuenta en el análisis de resultados en el rendimiento del cultivo de arroz.

Debido a que todos los tratamientos T1-T5 recibieron la misma dosis de biofertilizante, la mayor densidad observada en T5 no debe atribuirse al componente biológico de manera aislada, pero si de manera integral. El resultado indica más bien que, sobre una condición constante de biofertilización, una mayor disponibilidad de NPK favoreció el mantenimiento de una población más elevada hasta el final del ciclo.

Desde el punto de vista agronómico, una mayor población no implica un incremento proporcional del rendimiento, debido a la capacidad de compensación del arroz mediante el macollamiento y la modificación de otros componentes productivos (Harrell & Blanche, 2010). Aunque T5 presentó la mayor densidad, la interpretación del rendimiento debe considerar conjuntamente la formación de panículas, fertilidad de las espiguillas, peso de grano y capacidad de llenado.

3.2. NÚMERO DE ESPIGUILLAS POR PANÍCULA

El número de espiguillas por panícula osciló entre 13,33 y 15,33, correspondientes a T1 y T5, respectivamente. Aunque se observó una tendencia numérica hacia mayores valores con 75 y 100 % de NPK, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre tratamientos (CV = 14,77 %) (Tabla 1).

La ausencia de diferencias estadísticas indica que, bajo las condiciones experimentales, el número de espiguillas por panícula presentó relativa estabilidad frente al gradiente de fertilización mineral cuando todos los tratamientos recibieron 20 L ha⁻¹ del biofertilizante. Este comportamiento puede relacionarse con el fuerte componente genético de la arquitectura de la panícula. Bai et al. (2016) y Rebolledo et al. (2016) identificaron regiones genéticas asociadas con la arquitectura de la panícula y el número de espiguillas en arroz.

Esta estabilidad no implica independencia absoluta de la nutrición. Zhou et al. (2017) demostraron que la aplicación de N durante etapas tardías puede incrementar el número de espiguillas diferenciadas y supervivientes, evidenciando que la respuesta depende tanto de la cantidad de N como de su disponibilidad durante las etapas críticas del desarrollo reproductivo.

En el presente estudio, el NPK fue fraccionado y acompañado permanentemente por el componente biológico, por lo que la respuesta observada representa el comportamiento conjunto del sistema de nutrición. El ligero incremento numérico observado en T4 y T5 debe verse como una tendencia, pero como no evidencia un efecto estadísticamente diferencial.

3.3. NÚMERO DE GRANOS POR PANÍCULA

El número de granos por panícula presentó valores entre 126,66 y 149,42, correspondientes a T1 y T3, respectivamente. El CV fue de apenas 7,58 %, lo que evidencia una variabilidad relativamente baja; por ende, no se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos (Tabla 1).

El mayor valor numérico observado en T3 refleja una respuesta específica al 50 % de NPK, debido a que todas las medias pertenecieron al mismo grupo estadístico. Bajo las condiciones del ensayo, la reducción de la fertilización mineral no modificó significativamente este componente cuando se mantuvo constante la aplicación de microorganismos beneficiosos.

La literatura demuestra que la formación de espiguillas y granos por panícula depende de la interacción entre genotipo, disponibilidad de N y momento de aplicación.

Yoshiaki et al. (2011) encontraron que el N disponible durante el desarrollo de la panícula puede aumentar el número de espiguillas, mientras que Zhou et al. (2017) observaron incrementos asociados con aplicaciones tardías de N.

Una posible interpretación de la estabilidad encontrada es que el componente biológico pudo contribuir a reducir las diferencias en la disponibilidad efectiva de nutrientes entre las dosis minerales, dado que la investigación no incluyó tratamientos con diferentes dosis de biofertilizante, por lo tanto, es solo una hipótesis y no un mecanismo demostrado.

3.4. GRANOS LLENOS, GRANOS VANOS Y PORCENTAJE DE GRANOS VANOS

El número de granos llenos varió entre 63,00 y 88,00 por panícula, mientras que los granos vanos oscilaron entre 42,33 y 72,66. El porcentaje de granos vanos presentó valores entre 32,48 y 50,26 %. Aunque se observaron tendencias numéricas favorables con mayores niveles de NPK, no se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos (Tabla 1, Figura 1).

T5 presentó el mayor número de granos llenos y T4 y T5 los menores valores numéricos de granos vanos. No obstante, la ausencia de diferencias estadísticas indica que estas variaciones no pueden atribuirse de manera concluyente a las dosis de NPK.

La fertilidad de las espiguillas depende de múltiples factores: el estado nutricional puede influir en la formación y mantenimiento del aparato fotosintético y en la disponibilidad de fotoasimilados, mientras que el K interviene en procesos relacionados con regulación estomática y transporte de asimilados. Xu et al. (2023) encontraron que la interacción N-K puede modificar la dinámica de llenado de las espiguillas y contribuir al rendimiento del cultivo.

En el presente estudio debe otorgarse especial importancia al comportamiento hídrico. El cultivo fue establecido bajo condiciones de secano favorecido y durante el ciclo se presentó un periodo de déficit hídrico, particularmente hacia las fases finales. El arroz es altamente sensible al déficit hídrico durante la fase reproductiva, debido a que el estrés puede afectar la antesis, la dehiscencia de las anteras, la fertilización y el posterior llenado de los granos (He & Serraj, 2012; Tsuda, 1993).

La elevada proporción de granos vanos observada, especialmente en T1-T3, no debería atribuirse exclusivamente a la disponibilidad de NPK. Es más apropiado interpretarla como resultado de la interacción entre nutrición, disponibilidad hídrica, estado fisiológico de la planta y capacidad de suministro de fotoasimilados. Kobata et al. (2013) señalaron que la esterilidad de las espiguillas puede incrementarse cuando la disponibilidad de asimilados resulta insuficiente frente a una elevada demanda reproductiva.

Es importante para interpretar la respuesta productiva del ensayo: una mayor disponibilidad de nutrientes no garantiza un buen rendimiento, ya que el cultivo depende de otras variables del medio (humedad, manejo del cultivo, etc.). El comportamiento de los granos llenos y vanos refuerza la necesidad de interpretar la fertilización dentro del contexto integral de manejo del cultivo.

Al expresar los resultados como porcentaje de granos vanos, los valores oscilaron entre 32,48 y 50,26 %, correspondientes a T5 y T1, respectivamente. Aunque T5 presentó una reducción numérica cercana al 35,4 % respecto a T1, las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Esta variación observada como una tendencia agronómica, no debe explicar con base en la fertilización mineral.

El porcentaje de granos vanos integra procesos relacionados con la fertilidad de las espiguillas y el llenado del grano, los cuales dependen de la disponibilidad de asimilados durante la etapa reproductiva. Kobata et al. (2013) señalaron que una disponibilidad insuficiente de asimilados alrededor de la floración puede incrementar la esterilidad de las espiguillas, particularmente en las posiciones inferiores de la panícula. Así, Fu et al. (2019) encontraron que una elevada disponibilidad de N no siempre mejora el llenado del grano, debido a que pueden persistir limitaciones en la distribución de asimilados hacia determinadas espiguillas. Estos antecedentes indican que la respuesta del vaneamiento frente a la fertilización no obedece a un modelo matemático específico.

En el presente ensayo, la elevada proporción de granos vanos, especialmente en T1, se debe quizás a que el cultivo estuvo sometido a déficit hídrico durante la etapa reproductiva y de llenado, condición que puede afectar la fertilidad de las espiguillas y la translocación de asimilados. Los valores obtenidos fueron superiores a los reportados por Hernández et al. (2021), quienes registraron entre 10,43 y 22,28 granos vanos por panícula en arroz F-2000 bajo condiciones de manejo de micronutrientes. Esta diferencia puede estar relacionada con el genotipo, las condiciones edáficas y nutricionales y, particularmente, con el régimen hídrico de ambos ensayos.

Aunque T5 presentó simultáneamente el mayor número de granos llenos y uno de los menores valores de granos vanos, T4 y T5 no difirieron estadísticamente. El comportamiento observado sugiere que el incremento de NPK por encima del 75 % no produjo una mejora comprobable en la fertilidad de las panículas. La presencia constante del biofertilizante en T1-T5 también debe considerarse: su efecto individual no puede separarse de las dosis de NPK con este diseño, aunque su participación como componente complementario de la nutrición podría haber contribuido a mantener relativamente estable la respuesta reproductiva.

En conjunto, el porcentaje de granos vanos no respondió significativamente a las dosis de NPK evaluadas en presencia del biofertilizante. La variación numérica observada sugiere una posible mejora del llenado con mayores niveles de fertilización, pero su expresión estuvo probablemente condicionada por factores ambientales, particularmente la disponibilidad hídrica durante la fase reproductiva. Este comportamiento ayuda a explicar por qué las diferencias en algunos componentes de la panícula no se tradujeron necesariamente en respuestas proporcionales del rendimiento.

3.5. PESO DE 1000 GRANOS

El peso de 1000 granos osciló entre 23,17 y 24,73 g, correspondientes a T1 y T5, respectivamente. No se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos y el CV fue de 10,24 % (Tabla 1).

Aunque se observó una tendencia numérica hacia un incremento del peso de grano con mayores dosis de NPK, la diferencia entre T1 y T5 fue de apenas 1,56 g y no estuvo respaldada por significancia estadística. Bajo las condiciones que se hizo el ensayo, la reducción de la fertilización mineral acompañada por microorganismos beneficiosos no produjo una disminución estadísticamente demostrable del peso individual de los granos.

La estabilidad de esta variable puede relacionarse con el fuerte componente genético que caracteriza el peso del grano. Zhang et al. (2013) y Huang et al. (2015) manifiestan que esta variable tiene un alto carácter genético, pero responde a las condiciones de manejo del cultivo, mientras que Kato (1999) destacó la importancia de la interacción entre características genéticas y condiciones ambientales durante el proceso de llenado.

El resultado también coincide con Masni y Wasli (2019), quienes encontraron que el peso de 1000 granos no presentó diferencias significativas ante diferentes niveles de NPK. Estos autores señalaron que el peso individual del grano está fuertemente condicionado por la variedad y que mayores dosis de fertilizantes no siempre redundan en mayor peso del grano.

Es importante señalar que el comportamiento del peso de 1000 granos indica que las diferencias observadas posteriormente en el rendimiento no estuvieron determinadas principalmente por cambios en el peso individual del grano, sino por la interacción entre población, fertilidad de las espiguillas y cantidad de grano efectivamente cosechado.

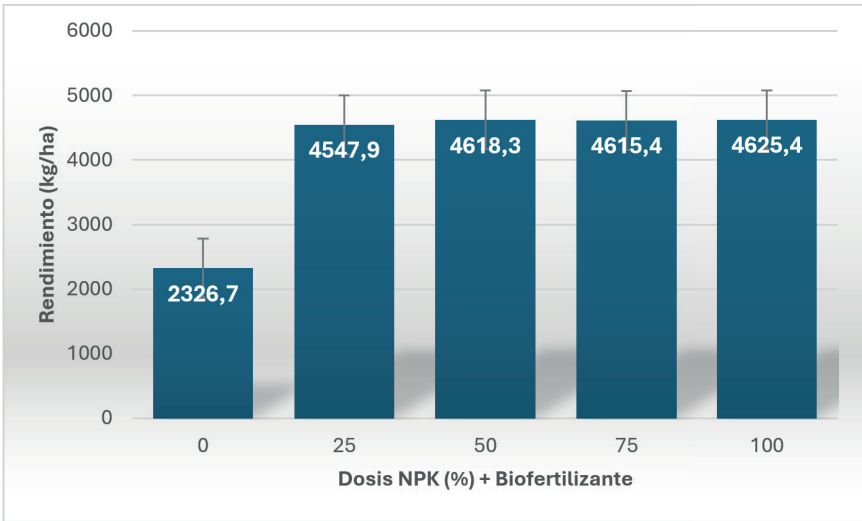
3.6. RENDIMIENTO DE GRANO

El rendimiento constituyó la respuesta productiva de mayor relevancia del ensayo. Se observaron diferencias altamente significativas entre tratamientos, con valores de

2.326,7 kg ha⁻¹ en T1 y 4.625,4 kg ha⁻¹ en T5. T2, T3, T4 y T5 no presentaron diferencias estadísticas entre sí y todos superaron significativamente a T1, que fue el tratamiento que recibió la menor dosis de NPK.

El comportamiento de las medias revela un incremento marcado entre T1 y T2: el rendimiento pasó de 2.326,7 a 4.547,9 kg ha⁻¹, equivalente a un aumento aproximado de 95 %. A partir del 25 % de NPK, aunque la respuesta se estabilizó. T3, T4 y T5 alcanzaron 4.618,3, 4.615,4 y 4.625,4 kg ha⁻¹, respectivamente. Gráficamente se puede apreciar que incrementos adicionales de NPK no produjeron ventajas productivas estadísticamente comprobables (Figura 1).

Figura 1. Rendimiento del cultivo de arroz en función a distintas dosis de fertilización química (NPK) en presencia de biofertilización con microorganismos beneficiosos nativos.



Particularmente relevante fue la comparación entre T2 y T5. El tratamiento con apenas 25 % de la dosis de NPK alcanzó 98,3 % del rendimiento máximo registrado en el ensayo. La diferencia entre ambos tratamientos fue de solo 77,5 kg ha⁻¹, inferior al 2 %, y estadísticamente no significativa.

Este comportamiento evidencia una respuesta de tipo meseta, más que una relación lineal entre dosis de fertilizante y rendimiento. Bajo las condiciones del suelo evaluado, la aplicación inicial de NPK, acompañada por el biofertilizante, generó una respuesta productiva marcada; sin embargo, una vez alcanzado determinado nivel de disponibilidad nutricional, cantidades adicionales de NPK tuvieron una contribución productiva limitada.

Esta respuesta es particularmente relevante en un suelo de baja oferta nutricional. T1, que recibió únicamente biofertilizante, produjo 2.326,7 kg ha⁻¹, mientras

que la incorporación de una dosis reducida de NPK permitió prácticamente duplicar el rendimiento. Estos resultados no respaldan la idea de que el biofertilizante pueda sustituir completamente la fertilización mineral. Por el contrario, respaldan un modelo de complementariedad, donde los microorganismos beneficiosos pueden contribuir al aprovechamiento de una cantidad reducida de nutrientes minerales.

Esta interpretación coincide con la literatura reciente, Li et al. (2024) quienes observaron que la inoculación con una bacteria fijadora de N favoreció la disponibilidad de N y P en la rizosfera y el crecimiento del arroz. Muthukrishnan et al. (2024) también encontraron respuestas favorables al combinar microorganismos con fertilización mineral reducida. Khan et al. (2023) destacan que la contribución de las bacterias beneficiosas a la nutrición vegetal depende de las condiciones del suelo, la composición microbiana y el ambiente.

Además, Ríos-Ruiz et al. (2025) señalan que los microorganismos promotores del crecimiento vegetal pueden intervenir mediante diversos mecanismos relacionados con la toma de nutrientes, producción de compuestos bioactivos y modificación de la rizosfera. Estos mecanismos ofrecen una explicación plausible para la respuesta observada; pero debe tenerse cuidado, ya que la caracterización microbiológica realizada correspondió únicamente a poblaciones totales de hongos y bacterias y no se determinaron las funciones metabólicas individuales.

Es de anotar que los mecanismos de acción incluyen procesos descritos para microorganismos promotores del crecimiento vegetal, pero tales funciones no fueron caracterizadas individualmente en el consorcio utilizado en este estudio. Por ello, es mejor hablar de un posible efecto complementario sobre la eficiencia nutricional que atribuir directamente el incremento del rendimiento a fijación de N, solubilización de P o producción hormonal específica.

Los resultados adquieren mayor relevancia al considerar la respuesta de T1. La aplicación de microorganismos sin NPK no alcanzó los rendimientos obtenidos con la combinación de biofertilizante y fertilización mineral. Esto indica que, bajo las condiciones de un suelo de baja oferta nutricional, la fuente biológica por sí sola no proporcionó una oferta nutricional suficiente para satisfacer completamente la demanda del cultivo. Por ende, el valor agronómico del biofertilizante es fundamental en este tipo de suelos y funciona de manera íntegra con una dosis reducida de fertilización mineral.

Estudios recientes han mostrado que la combinación de biofertilizantes con fertilización mineral puede mantener el rendimiento con menor utilización de fertilizantes. En un ensayo de campo de varios años, Hu et al. (2024) encontraron que el uso de

biofertilizantes permitió reducir la fertilización nitrogenada manteniendo el rendimiento del arroz y disminuyendo pérdidas de N.

Es de anotar que los resultados obtenidos con T2 no debe usarse como una recomendación universal de aplicar un 25 % de NPK. Lo que demuestra el experimento es que bajo las condiciones específicas del suelo, cultivar, clima, manejo hídrico, tipo y dosis de biofertilizante y fertilización utilizadas, una reducción sustancial de NPK permitió mantener un rendimiento estadísticamente equivalente al obtenido con las dosis superiores.

4. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico evidenció diferencias importantes entre las estrategias de fertilización mineral en combinación con la biofertilización. Los costos totales de producción de los tratamientos biofertilizados aumentaron desde \$3.909.005 ha⁻¹ en T1 hasta \$6.073.810 ha⁻¹ en T5, debido principalmente al incremento de los costos asociados con la fertilización mineral y la recolección del mayor volumen de grano (Tabla 2). El incremento de los costos no estuvo acompañado por un aumento proporcional del rendimiento. T2 produjo 4.547,9 kg ha⁻¹, mientras que T3, T4 y T5 alcanzaron valores muy similares, entre 4.615,4 y 4.625,4 kg ha⁻¹.

Tabla 2. Análisis económico de la evaluación del uso de biofertilizantes como sustituto parcial de la fertilización química del cultivo de arroz en un suelo de baja oferta nutricional.

Tratamientos			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Detalle	Unidad	Costo	0 NPK+BF	25%NPK +BF	50%NPK +BF	75%NPK +BF	100%NPK +BF	100%NPK- BF	(0%NPK- BF)
Costos producción a cosecha	ha	5.380.000	3.560.000	4.015.000	4.470.000	4.925.000	5.380.000	6.208.000	3.460.000
Costo recolección	kg	150	349.005	682.185	692.745	692.310	693.810	-	-
Rendimiento			2.327	4.548	4.618	4.615	4.625	-	-
Total costos de producción	ha	5.380.150	3.909.005	4.697.185	5.162.745	5.617.310	6.073.810	6.208.000	3.460.000
Ingresos brutos	kg		3.611.038	7.058.341	7.167.602	7.163.101	7.178.621	0	0
Utilidad Bruta			-297.967	2.361.156	2.004.857	1.545.791	1.104.811	-6.208.000	-3.460.000
Relación Beneficio/costo			0,9237	1,5026	1,3883	1,2751	1,1818	0	0

El tratamiento T2 presentó la mayor utilidad, con \$2.361.156 ha⁻¹, y la mayor relación beneficio/costo, con 1,50. T3, T4 y T5 presentaron relaciones beneficio/costo de 1,39, 1,28 y 1,18, respectivamente. El descenso progresivo de este indicador demuestra que el incremento de la inversión en fertilización mineral por encima del 25 % de NPK no generó un retorno económico proporcional.

La comparación entre T2 y T5 resulta particularmente ilustrativa. T2 alcanzó el 98,3 % del rendimiento de T5, pero presentó un costo total \$1.376.625 ha⁻¹ menor, equivalente a una reducción de aproximadamente 22,7 %. El incremento de cuatro veces en la dosis de NPK entre T2 y T5 generó solamente 77 kg ha⁻¹ adicionales de arroz, bajo las condiciones del experimento.

El costo de producción por kilogramo también favoreció a T2, con aproximadamente \$1.033 kg⁻¹, frente a \$1.118, \$1.217 y \$1.313 kg⁻¹ para T3, T4 y T5, respectivamente. T1 presentó el mayor costo unitario entre los tratamientos productivos, aproximadamente \$1.680 kg⁻¹, debido principalmente a su menor rendimiento. Los valores económicos y productivos se encuentran consignados en la información original del ensayo.

Estos resultados muestran que la menor dosis de fertilizante podría ser la alternativa económicamente más eficiente, T1, a pesar de presentar menores costos de fertilización, produjo un rendimiento insuficiente para generar rentabilidad. La eficiencia económica surgió de la combinación entre reducción de NPK y mantenimiento de un nivel elevado de productividad.

Los tratamientos T6 y T7 presentaron rendimiento nulo y, por lo tanto, relaciones beneficio/costo de cero. Debe señalarse, que ambos tratamientos no alcanzaron la cosecha durante el periodo de déficit hídrico ocurrido aproximadamente desde los 70 días después de la emergencia. Este comportamiento constituye una observación complementaria del ensayo y no permite atribuirle la mortalidad de las plantas a la ausencia del biofertilizante.

Esta precaución es particularmente importante, el hecho de que T6 recibiera 100 % de NPK y no alcanzara producción indica que una mayor inversión en fertilización mineral no garantiza por sí sola un rendimiento elevado cuando existen restricciones ambientales severas. El resultado sugiere una posible interacción entre nutrición y disponibilidad hídrica, pero el experimento no fue diseñado específicamente para evaluar tolerancia al déficit hídrico, pero fue notorio que los tratamientos que recibieron la biofertilización pudieron prosperar hasta el final del ensayo.

De manera integral, el análisis económico identifica a T2 (25 % NPK + biofertilizante) como la alternativa de mayor eficiencia agronómica y económica bajo las condiciones

del ensayo. Esta combinación permitió alcanzar un rendimiento cercano al máximo experimental con una inversión considerablemente menor, lo que respalda el potencial de la biofertilización como estrategia complementaria para reducir la dependencia de fertilizantes minerales.

5. CONCLUSIONES

1. La incorporación de microorganismos beneficiosos en combinación con fertilización mineral permitió mantener elevados niveles de productividad del arroz con una reducción sustancial de la dosis de NPK, bajo las condiciones edafoclimáticas y de manejo evaluadas.
2. Los principales componentes del rendimiento (espiguillas por panícula, granos por panícula y peso de 1000 granos) presentaron una respuesta relativamente estable frente al gradiente de NPK cuando se aplicó una dosis constante de biofertilizante. Las variaciones observadas en granos llenos y vanos mostraron tendencias agronómicas, pero no diferencias estadísticas.
3. El rendimiento presentó una respuesta de tipo meseta: el incremento desde 0 hasta 25 % de NPK produjo la mayor respuesta productiva, mientras que las dosis superiores no generaron aumentos estadísticamente significativos. T2 alcanzó el 98,3 % del máximo rendimiento registrado en el ensayo.
4. La aplicación de microorganismos beneficiosos sin fertilización mineral no fue suficiente para alcanzar el rendimiento obtenido mediante su combinación con NPK, por lo que los resultados respaldan un enfoque de complementariedad y no de sustitución absoluta de la fertilización mineral.
5. La combinación de 25 % de NPK con 20 L ha⁻¹ del biofertilizante presentó la mayor eficiencia económica, con una utilidad de \$2.361.156 ha⁻¹ y una relación beneficio/costo de 1,50.
6. Los resultados respaldan el potencial de los microorganismos beneficiosos como componente de estrategias de manejo integrado de la nutrición para disminuir la dependencia de fertilizantes minerales. Aunque su efectividad debe validarse mediante ensayos multisitio, diferentes cultivares, condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica y caracterización funcional de los microorganismos empleados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bai, X., et al. (2016). Genome-wide association analysis reveals different genetic control in panicle architecture between indica and japonica rice. *The Plant Genome*. <https://doi.org/10.3835/plantgenome2015.11.0115>
- Coggins, S., McDonald, A. J., Silva, J. V., et al. (2025). Data-driven strategies to improve nitrogen use efficiency of rice farming in South Asia. *Nature Sustainability*. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01496-3>
- Du, M., Zhang, W., Gao, J., Liu, M., Zhou, Y., He, D., Zhao, Y., & Liu, S. (2022). Improvement of root characteristics due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions increases rice yield and nitrogen use efficiency. *Agronomy*, 13(1), 18–44. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010023>
- Federación Nacional de Arroceros. (2026). *Área, producción y rendimiento*. Fondo Nacional del Arroz. <https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/area-produccion-y-rendimiento>
- Fu, P., Wang, J., Zhang, T., Huang, J., & Peng, S. (2019). High nitrogen input causes poor grain filling of spikelets at the panicle base of super hybrid rice. *Field Crops Research*, 244, 107635. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107635>
- Harrell, D. L., & Blanche, S. B. (2010). Tillage, seeding, and nitrogen rate effects on rice density, yield, and yield components of two rice cultivars. *Agronomy Journal*, 102(2), 592–597. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0390>
- He, H., & Serraj, R. (2012). Involvement of peduncle elongation, anther dehiscence and spikelet sterility in upland rice response to reproductive-stage drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.09.004>
- Hernández, J., Salazar, S., & Rodríguez, E. (2021). Efecto de los elementos menores en la calidad molinera del arroz (*Oryza sativa* L.) variedad F-2000. *Revista Mutis*, 11(1), 8–21. <https://doi.org/10.21789/22561498.1711>
- Hu, M., Xue, H., Wade, A. J., Gao, N., Qiu, Z., Long, Y., & Shen, W. (2024). Biofertilizer supplements allow nitrogen fertilizer reduction, maintain yields, and reduce nitrogen losses to air and water in China paddy fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 362, 108850. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108850>
- Huang, L., et al. (2015). Mapping of qTGW1.1, a quantitative trait locus for 1000-grain weight in rice. *Rice Science*, 22(1), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2015.05.002>
- Kato, T. (1999). Genetic and environmental variations and associations of the characters related to the grain-filling process in rice cultivars. *Plant Production Science*, 2(1), 32–36. <https://doi.org/10.1626/pp.s.2.32>
- Khan, N., Humm, E. A., Jayakarunakaran, A., & Hirsch, A. M. (2023). Reviewing and renewing the use of beneficial root and soil bacteria for plant growth and sustainability in nutrient-poor, arid soils. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1147535. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1147535>
- Kobata, T., Yoshida, H., Masiko, U., & Honda, T. (2013). Spikelet sterility is associated with a lack of assimilate in high-spikelet-number rice. *Agronomy Journal*, 105, 1821–1831. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0115>

Li, P., Tian, Y., Yang, K., Tian, M., Zhu, Y., Chen, X., Hu, R., Qin, T., Liu, Y., Peng, S., Yi, Z., Liu, Z., Ao, H., & Li, J. (2024). Mechanism of microbial action of the inoculated nitrogen-fixing bacterium for growth promotion and yield enhancement in rice (*Oryza sativa* L.). *Advanced Biotechnology*, 2(4), 32. <https://doi.org/10.1007/s44307-024-00038-4>

Liu, et al. (2024). Localized nitrogen supply facilitates rice yield and nitrogen use efficiency by enabling root-zone nitrogen distribution and root growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1326311>

Ma, J., Chen, T., Lin, J., Fu, W., Feng, B., Li, G., Li, H., Li, J., Wu, Z., Tao, L., Fu, G. (2022). Functions of Nitrogen, Phosphorus and Potassium in Energy Status and Their Influences on Rice Growth and Development. *Rice Science*, 2022, 29(2): 166-178. <http://dx.doi.org/> <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.005>

Masni, Z., & Wasli, M. E. (2019). Yield performance and nutrient uptake of red rice variety (MRM 16) at different NPK fertilizer rates. *International Journal of Agronomy*, 2019, 5134358. <https://doi.org/10.1155/2019/5134358>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2006). Plan Frutícola Nacional: Desarrollo de la fruticultura en Córdoba. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Gobernación de Córdoba, Fondo Nacional de Fomento Hortofrutícola, Asociación Hortofrutícola de Colombia y la Sociedad de Agricultores y Ganaderos del Valle del Cauca. Montería. p22

Muthukrishnan, G., Munisamy, J., Gopalasubramaniam, S. K., Subramanian, K. S., Dharmaraj, R., Nath, D. J., Dutta, P., & Devarajan, A. K. (2024). Impact of foliar application of phyllosphere yeast strains combined with soil fertilizer application on rice growth and yield. *Environmental Microbiome*, 19, 102. <https://doi.org/10.1186/s40793-024-00635-9>

Rebolledo, M., Peña, A., Duitama, J., Cruz, D., Dingkuhn, M., Grenier, C., & Thome, J. (2016). Combining image analysis, genome wide association studies and different field trials to reveal stable genetic regions related to panicle architecture and the number of spikelets per panicle in rice. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1384. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01384>

Ríos-Ruiz, W. F., Jave-Concepción, H. G., Torres-Chávez, E. E., Rios-Reategui, F., Padilla-Santa-Cruz, E., & Guevara-Pinedo, N. E. (2025). Plant-growth-promoting microorganisms: Their impact on crop quality and yield, with a focus on rice. *International Journal of Plant Biology*, 16(1), 9. <https://doi.org/10.3390/ijpb16010009>

Schütz, L., Gatteringer, A., Meier, M., Müller, A., Boller, T., Mäder, P., & Mathimaran, N. (2018). Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization – A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2204. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>

Tian, G., Gao, L., Kong, Y., Hu, X., Xie, K., Zhang, R., Ling, N., Shen, Q., & Guo, S. (2017). Improving rice population productivity by reducing nitrogen rate and increasing plant density. *PLoS ONE*, 12(8), e0182310. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182310>

Timofeeva, A. M., Galyamova, M. R., & Sedykh, S. E. (2023). Plant growth-promoting soil bacteria: Nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities. *Plants*, 12(24), 4074. <https://doi.org/10.3390/plants12244074>

Tsuda, M. (1993). Grain filling in rice subjected to drought at three stages. *Japanese Journal of Crop Science*, 62, 199–205. <https://doi.org/10.1626/jcs.62.199>

Xu, W., Li, J., Feng, J., et al. (2023). Nitrogen and potassium interactions optimized asynchronous spikelet filling and increased grain yield of japonica rice. *PeerJ*, 11, e14710. <https://doi.org/10.7717/peerj.14710>

Yoshiaki, K., Yoshida, J., Palta, T., & Tatsuhiko, S. (2011). N applications that increase plant N during panicle development are highly effective in increasing spikelet number in rice. *Field Crops Research*, 122, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.016>

Zhang, Y., et al. (2013). QTL mapping of grain weight in rice and the validation of the QTL qTGW3.2. *Gene*, 527(1), 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2013.05.063>

Zhou, W., Lv, T., Chen, Y., Hu, J., Zhang, Q., & Ren, W. (2017). Late nitrogen application enhances spikelet number in indica hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *Scientia Agricola*, 74, 161–168. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0094>

CAPÍTULO 9

THE GREAT UNKNOWN: USE OF LIVE FOOD IN AQUACULTURE¹

Data de submissão: 24/08/2026

Data de aceite: 10/09/2026

Marco Polo Franco Archundia

Laboratorio de Acuicultura e Hidrobiología
Centro de Investigaciones Biológicas
Universidad Autónoma del
Estado de Morelos
Cuernavaca, Morelos, México
<https://orcid.org/0000-0003-4954-5100>

Héctor Eduardo Franco-Cotero

Maestría en Manejo de Recursos Naturales
Centro de Investigaciones Biológicas
Universidad Autónoma del
Estado de Morelos
Cuernavaca, Morelos, México
<https://orcid.org/0000-0002-8054-7078>

Jimena Ramos

Maestría en Manejo de Recursos Naturales
Centro de Investigaciones Biológicas
Universidad Autónoma del
Estado de Morelos
Cuernavaca, Morelos, México

Luis Ángel Fabro-Leal

Facultad de Ciencias Biológicas
Centro de Investigaciones Biológicas
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Cuernavaca, Morelos, México

Fátima Getsemaní Osorio-Arce

Facultad de Ciencias Biológicas
Centro de Investigaciones Biológicas
Universidad Autónoma del
Estado de Morelos
Cuernavaca, Morelos, México

ABSTRACT: The nutrition of aquatic organisms in aquaculture determines whether they reach their full potential or fall short. The most common practice in fish farming is the use of commercial processed feed. However, during manufacturing, these foods undergo industrial drying processes that denature their nutrients. Live food is an excellent option for use as a substitute or nutritional supplement in aquaculture. These organisms provide the optimal concentration of essential nutrients, ensuring that fish grow at an appropriate rate, display good coloration, and maintain an effective immune system. In this chapter, we present the production, use, and specifications of these organisms and discuss the advantages and disadvantages of their use in aquaculture. Likewise, we propose innovative options to complement feeding on aquaculture farms. Cultures of these organisms are fast, cost-effective, and can be supplied to fish of all sizes. Transitioning from a diet based solely on processed foods to one based on live foods represents a significant step toward high-tech, high-yield aquaculture. Meeting the nutritional needs of fish not only ensures their

¹ Este trabajo se origina en la tesis de maestría de H. Franco-Cotero. Agradecemos a la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Morelos, Fondo Verde Estatal, por el apoyo otorgado (13/P082024).

survival but also results in healthier animals with accelerated growth, greater reproductive success, and more vibrant colors.

KEYWORDS: fish farming; ornamental fish; food fish; sustainable aquaculture.

EL GRAN DESCONOCIDO: USO DEL ALIMENTO VIVO EN LA ACUICULTURA

RESUMEN: La nutrición de los organismos acuáticos en la acuicultura determina si alcanzan su máximo potencial o se quedan a mitad del camino. La práctica más común en el cultivo de peces es el uso de alimentos comerciales procesados. Sin embargo, al fabricar estos alimentos, sus ingredientes se someten a procesos industriales de secado, lo que provoca la desnaturalización de sus nutrientes. El alimento vivo es una excelente opción que puede utilizarse como sustituto o complemento nutricional en la acuicultura. Estos comestibles aportan la concentración óptima de nutrientes esenciales que garantizan que los peces crezcan a un ritmo adecuado, presenten una buena coloración y tengan un sistema inmunitario eficaz. En este capítulo mostramos la producción, el uso y las especificaciones y discutimos las ventajas e inconvenientes de estos organismos utilizados en la acuicultura. De igual forma, se plantean algunas opciones novedosas que pueden complementar la alimentación en las granjas acuícolas. Los cultivos de estos organismos se caracterizan por ser rápidos, rentables y pueden suministrarse a peces de todos los tamaños. La transición de una dieta basada únicamente en alimentos procesados a otra basada en alimentos vivos representa un paso definitivo hacia una acuicultura tecnificada y de alto rendimiento. Mantener las necesidades nutricionales de los peces no sólo asegura su supervivencia, también se obtienen animales más sanos, con un crecimiento acelerado, mayor éxito reproductivo y colores más vibrantes.

PALABRAS CLAVE: piscicultura; peces de ornato; peces de consumo humano; acuicultura sustentable.

1. FEEDING IN AQUACULTURE

Proper feeding and nutrition are critical in aquaculture. The nutrition of aquatic organisms in captivity determines whether they reach their full potential or fall short. Today, the most common practice in fish farming is the use of commercial processed feeds (Araujo et al., 2022). These pellets are practical solutions that have dominated the industry for years; however, dry diets carry operational and biological costs that cannot be ignored (Arce et al., 2018).

In nature, fish survival depends on visual cues from moving prey to trigger predatory behavior (Fuiman & Magurran, 1994). In captivity, processed food can settle to the bottom if not consumed. In this scenario, not only is the input wasted, but the edible material also degrades in the aquatic environment, thereby affecting water quality and putting the entire cultivation system at risk. On the other hand, during the manufacture of these foods, the ingredients undergo industrial drying to facilitate commercialization and storage (Araujo et al., 2022). This process denatures nutrients, drastically reducing their

digestibility and absorption by the body (Evrendilek, 2024). Live food is a viable nutritional substitute or supplement in aquaculture. Live food provides the optimal concentration of essential nutrients, such as proteins, carbohydrates, lipids, vitamins, and minerals, ensuring that fish grow at appropriate rates, display good coloration, and have an effective immune system (Samat et al., 2020).

2. WHAT IS LIVE FOOD, AND WHY IS IT SO GOOD?

Live food consists of micro- and macroorganisms with sizes, shapes, and consistencies suitable for consumption by farmed aquatic animals. This food is also distinguished by its profitability, due to high cultivation densities, and by biological advantages that commercial pellets cannot replicate, such as mobility (Franco et al., 2025). For many species, especially during the fry stage, the instinct to hunt triggers feeding. A stationary pellet may go unnoticed and sink to the bottom, whereas a small crustacean swimming in the water column triggers an immediate biological response that ensures the fish will feed on it. Therefore, live food is not just food but a functional biological package necessary for our cultures to develop under optimal conditions (Arce et al., 2018). The nutritional quality of live food is primarily characterized by the percentages of proteins, lipids, and carbohydrates (Table 1). On the other hand, this food has a broad profile of essential amino acids for fish development: arginine, histidine, isoleucine, leucine, lysine, methionine, phenylalanine, threonine, tryptophan, and valine. These must be supplied in their diet and are crucial for optimal growth, as fish cannot synthesize them (Wilson, 1986). But these organisms not only provide enzymes and vital nutrients for proper fish development, but they also contain pigments that enhance the coloration of these animals in captivity (Arce et al., 2018).

Table 1. Nutritional content of the organisms used as live food (Franco et al., 2025).

Organism	Proteins	Carbohydrates	Lipids
Phytoplankton	56%	17%	6%
Rotifers (Rotifera)	51%	9%	33%
Vinegar eel (<i>Turbatrix aceti</i>)	15%	10%	24%
Free-living nematode (<i>Panagrellus redivivus</i>)	62%	17%	24%
Grindal worm (<i>Enchytraeus buchholzi</i>)	12%	10%	11%

Organism	Proteins	Carbohydrates	Lipids
Water flea (Cladocera)	50%	4%	19%
Artemia (<i>Artemia</i> sp.)	57%	11%	16%
Amphipods (Amphipoda)	44%	9%	9%
Beetle (<i>Ulomoides</i> <i>dermestoides</i>)	27%	35%	21%
Fairy Shrimp (<i>Streptocephalus mackini</i>)	54%	7%	11%
Tubifex (<i>Tubifex tubifex</i>)	55%	4%	14%
Tenebrio (<i>Tenebrio molitor</i>)	51%	5%	37%

Pigmentation is one of the clearest indicators of health and quality. Living organisms are often rich in natural pigments, such as carotenoids (canthaxanthin, beta-carotene, lutein, astaxanthin, taraxanthin, zeaxanthin, and echinenone) (Maoka, 2020). Microalgae, crustaceans, and insects naturally acquire these pigments, and when consumed by fish, they are incorporated into chromatophores, the cells that reflect them. Notably, these natural colorants are incorporated more efficiently into fish tissues than artificial colorants and produce tones such as red, yellow, and orange (Sathyaruban et al., 2021). The result is more intense, natural coloration, a key factor for species of high ornamental and commercial value. Live food has several properties that make it the best choice for aquaculture. But what about its diversity, cultivation, and availability?

3. FOOD FOR THE INITIAL PHASES

Microalgae, or phytoplankton, are the primary food source for small fish. These photosynthetic microorganisms are found in aquatic systems, and phytoplankton is commonly known as “green water”. Rotifers, on the other hand, are microscopic animals and constitute the main component of zooplankton. Both groups are rich in proteins, lipids, and carbohydrates and can reach up to two millimeters in length, an ideal size for fry to feed on them (Napiórkowska-Krzebietke, 2017). Their extensive cultivation involves reproducing various species of these microorganisms in a single space, typically in water-filled containers placed outdoors to ensure the microalgae can photosynthesize, providing

food for the rotifers. In the end, this green water can be used as food for the fry in our culture (Image 1).

Image 1. Outdoor cultivation of phytoplankton and zooplankton.



Another microscopic organism well suited for feeding fish in the early stages is the vinegar eel (*Turbatrix acetii*). This nematode measures less than two millimeters long and feeds on bacteria that ferment sugar and fruit. Unlike phytoplankton and zooplankton, this organism has higher lipid than protein concentrations. Cultures are grown in glass containers with openings that should be covered with mosquito netting to prevent contamination by other organisms. The main requirement is apple cider vinegar mixed with water, and the primary consideration is to rinse it with water before adding it to the fish culture, as its acidity can alter the pH (Franco et al., 2025).

The free-living nematode (*Panagrellus redivivus*) and the annelid Grindal worm (*Enchytraeus buchholzi*) are widely used in aquaculture. The cultivation of these organisms is very similar, as it is carried out in plastic or glass containers with openings to ensure oxygen entry, and the openings should be covered with mosquito netting to prevent the entry of other organisms (Figueroa, 2009). In free-living nematode cultivation, commercial oats and water enriched with powdered milk are used to optimize the culture medium (Image 2). In Grindal worm cultivation, the most common substrate is coconut fiber, in which pet food pellets or pieces of ham or sausage are placed for feeding and subsequent reproduction (Image 3). Both cultures must be kept moist to support reproduction. It is advisable to carefully collect live food and rinse it with clean water before feeding it to the fish to avoid contaminating the cultures (Franco et al., 2025).

Image 2. Cultivation of free-living nematodes in a plastic container.



Image 3. Cultivation of Grindal worms on coconut fiber.



4. MENU FOR ALL SIZES

Water fleas (Cladocera) and amphipods (Amphipoda) are protein-, lipid-, and carbohydrate-rich crustaceans that inhabit freshwater, brackish, and terrestrial environments. These groups include species of various sizes, making them suitable as food for fish of different sizes. These crustaceans are filter-feeding aquatic animals that feed on organic matter; they can be cultured in aquariums or ponds (Image 4). The containers should be exposed to direct sunlight to support microalgae photosynthesis, which provides their food (Image 5). Various organic fertilizers, such as chicken manure or rice bran, can be used to ensure adequate organic matter in the culture. During the rainy season, it is advisable to cultivate in a covered or shaded area, as rain can cause substrate movement and alter water quality (Franco et al., 2025).

Image 4. Amphipods of the genus *Gammarus* observed under a microscope.

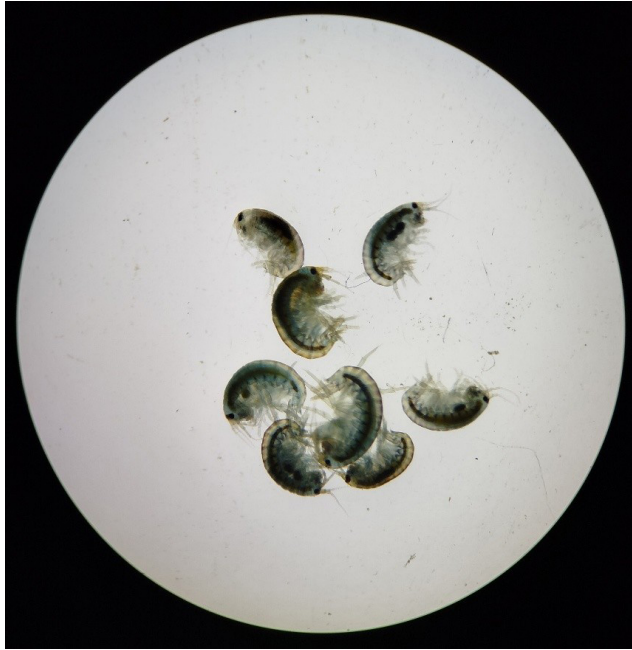
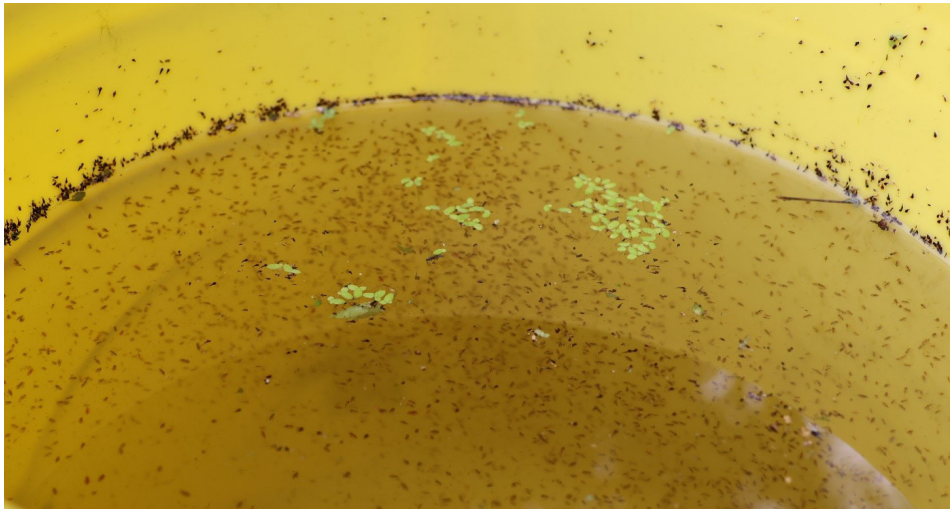


Image 5. Water flea of the genus *Daphnia* cultivated outdoors in a plastic bucket.



Another crustacean widely used in aquaculture is *Artemia* (*Artemia* sp.), perhaps the most famous organism in aquaculture feeding. It reaches a size of two centimeters in its adult stage, while in the nauplius stage it measures just 400 microns. Like water fleas and amphipods, *Artemia* varies in size throughout its life cycle and can be used as feed for fry, juvenile fish, and adults (Image 6). This organism is widely

distributed and commercially cultivated in aquaculture for its high protein content and adaptability to various salinity levels (Madkour et al., 2023). For extensive, non-technified cultivation, open-top tanks or tubs are used to ensure exposure to sunlight. The solution concentration is 15 grams of non-iodized coarse salt per liter of water. Artemia cysts are added to this medium, where they hatch, allowing the crustaceans to grow and reproduce. Artemia can affect the hardness and salinity of the fish water, so it should be rinsed with water before feeding. Another consideration is that excessive distribution of this food can cause intestinal blockage in fish due to the chitin present in crustaceans, so it is recommended to feed to satiety rather than in excess (Franco et al., 2025).

Image 6. Artemia observed under the microscope.



5. MAIN COURSE FOR THE BIGGEST

For breeding or juvenile fish of large size, tenebrio (*Tenebrio molitor*) and beetles (*Ulomoides dermestoides*) are excellent live food options. These organisms are orange-brown beetles in the larval stage and black as adults. They are high in protein and carbohydrates and go through the four stages of metamorphosis: egg, larva, pupa, and adult. The larvae can reach up to three centimeters in length, and

during this stage they are eaten by fish (Image 7). They can be cultivated in plastic containers of various sizes with small openings to ensure adequate oxygen. Wheat bran and bread are their primary food sources, and they obtain water from pieces of fruit or vegetables. The containers should be longer than they are tall to provide space for movement. Because these beetles exhibit cannibalism, it is recommended to keep the cultures separated by stage: one for larvae, another for pupae, and another for adults (Franco et al., 2025).

Image 7. *Tenebrio* larvae ready to be supplied as live feed for cichlid fish.



Finally, another little-known species: the fairy shrimp (*Streptocephalus mackini*). This crustacean inhabits temporary freshwater bodies because it is highly vulnerable to predation by fish and other aquatic organisms in permanent waters (Image 8). Fairy shrimp are an important source of protein and produce embryos in the form of cysts that can remain dormant for long periods. During drought seasons, these cysts remain viable until environmental conditions trigger their hatching. Cultures can be maintained in aquariums or open-air ponds without an aeration system. The cultivation of fairy shrimp should include a layer of soil at the bottom for these organisms to lay their eggs. Frequent cleaning is unnecessary given their feeding habits; it is recommended to feed them phytoplankton, as they are filter feeders (Salaza et al., 2007).

Image 8. Fairy shrimp observed under the microscope.



6. THE BEST, A MENU THAT CARES FOR OUR FISH AND THE PLANET

The wide variety of organisms and their diverse cultures provide aquaculturists with a broad range of live food. This resource can be used to replace commercial foods or to supplement their farms. The best part is that it benefits not only fish but also our natural ecosystems. Live food reduces water pollution on farms and in aquariums by avoiding the use of commercial feed. Additionally, using live foods helps mitigate global warming, since producing dried foods generates large amounts of greenhouse gases. Transitioning from a diet based solely on processed foods to one based on live foods is a significant step toward high-tech, high-performance aquaculture. Maintaining the hunting instinct and meeting the species' nutritional needs not only ensures survival but also produces healthier animals, faster growth, higher reproductive success, and more vibrant colors. Recognizing that live food is a complete biological package, not just an input, is key to ensuring that the organisms in our care not only survive in captivity but also reach their maximum genetic and commercial potential.

REFERENCES

Araujo, G. S., Silva, J. W. A. D., Cotas, J., & Pereira, L. (2022). Fish farming techniques: current situation and trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1598. <https://doi.org/10.3390/jmse10111598>

- Arce, E., Franco, M., & Luna-Figueroa, J. (2018). The effect of live food on the coloration and growth in guppy fish, *Poecilia reticulata*. *Agricultural Sciences*, 9, 171-179. <https://doi.org/10.4236/as.2018.92013>
- Evrendilek, G. A. (2024). The effect of aquaculture feed on the nutritional quality of farmed seafood: A review of feed ingredients and their impact on human health. *Food Nutrition Chemistry*, 2, 287. <https://doi.org/10.18686/fnc287>
- Figueroa, J. (2009). Nematodo de vida libre *Panagrellus redivivus* (Goodey, 1945): Una alternativa para la alimentación inicial de larvas de peces y crustáceos. *Investigación y Ciencia*, 17(45), 4-11.
- Franco, M., García-Flores, A., Franco-Cotero, H., & Quiñonez-Maldonado, A. (2025). Cultivo y producción de alimento vivo para peces de ornato. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. https://doi.org/10.30973/2025/cultivo_alimento_peces
- Fuiman, L. A., & Magurran, A. E. (1994). Development of predator defences in fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 4(2), 145-183. <https://doi.org/10.1007/BF00044127>
- Madkour, K., Dawood, M. A., & Sewilam, H. (2023). The use of Artemia for aquaculture industry: An updated overview. *Annals of Animal Science*, 23(1), 3-10. <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0041>
- Maoka, T. (2020). Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of natural medicines*, 74(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x>
- Napiórkowska-Krzebietke, A. (2017). Phytoplankton as a basic nutritional source in diets of fish. *Journal of Elementology*, 22(3), 831-841. <https://doi.org/10.5601/jelem.2016.21.4.1375>
- Salaza, M., Torres, J., Linares, H., & Luna-Figueroa, J. (2007). Efecto de diferentes fertilizantes orgánicos sobre el cultivo en laboratorio del camarón duende de agua dulce *Streptocephalus mackini* (Crustacea: Anostraca). *Aqua TIC*, 26, 16-22.
- Sathyaruban, S., Uluwaduge, D. I., Yohi, S., & Kuganathan, S. (2021). Potential natural carotenoid sources for the colouration of ornamental fish: a review. *Aquaculture International*, 29(4), 1507-1528. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00689-3>
- Samat, N. A., Yusoff, F. M., Rasdi, N. W., & Karim, M. (2020). Enhancement of live food nutritional status with essential nutrients for improving aquatic animal health: A review. *Animals*, 10(12), 2457. <https://doi.org/10.3390/ani10122457>
- Wilson, R. P. (1986). Protein and amino acid requirements of fishes. *Annual review of nutrition*, 6, 225-244. <https://doi.org/10.1146/annurev.nu.06.070186.001301>

CAPÍTULO 10

COMPORTAMENTO E MANEIO DE BOVINOS AUTÓCTONES NAS MONTANHAS DO NORTE DE PORTUGAL

Data de submissão: 10/09/2026

Data de aceite: 21/09/2026

Marco André de Almeida Fernandes

PhD Candidate em Investigación
Agraria y Forestal pela
Universidad de Santiago de Compostela
Investigador-Agricultor em Agroecologia,
Pecuária Extensiva, Herbivoria Pírca e
Restauro pós-fogo
Universidade Politécnica de
Viana do Castelo, 4900-347
Viana do Castelo, Portugal
<https://orcid.org/0009-0003-4883-2420>

Gustavo Paixão

Centro de Investigação e
Desenvolvimento em Sistemas
Agro-alimentares e Sustentabilidade
(CISAS)
Universidade Politécnica de Bragança
5300-253, Bragança, Portugal
<https://orcid.org/0000-0002-9753-8370>

Joaquim Lima Cerqueira

Centro de Investigação e
Desenvolvimento em Sistemas
Agro-alimentares e Sustentabilidade
(CISAS)
Universidade Politécnica de
Viana do Castelo, 4900-347
Viana do Castelo, Portugal
<https://orcid.org/0000-0003-0022-2749>

José Pedro Araújo

Centro de Investigação de
Montanha (CIMO)
Escola Superior Agrária
Universidade Politécnica de
Viana do Castelo, 4900-347
Viana do Castelo, Portugal
<https://orcid.org/0000-0002-1232-3160>

RESUMO: Os sistemas de pastoreio extensivo de montanha no Norte e Centro de Portugal, protagonizados por raças autóctones como a Cachena, a Maronesa, a Barrosã, a Arouquesa, a Marinhova, a Minhota e a Mirandesa desempenham um papel crucial na gestão da paisagem, na prevenção de incêndios rurais e na conservação da biodiversidade. Esta revisão sistematiza os dados disponíveis sobre o comportamento destes animais e a sua interação com o território. A literatura específica para estas raças portuguesas é praticamente inexistente, com exceção de referências pontuais à Maronesa em projetos de conservação. Os dados disponíveis provêm maioritariamente de estudos realizados noutros sistemas de montanha europeus, nomeadamente nos Alpes, com outras raças. Da literatura consultada resultam os seguintes dados quantitativos: os bovinos dedicam 7,2 a 7,7 horas diárias ao pastoreio em montanha; a distância média diária percorrida é de 1,68 km; o período de descanso ótimo da pastagem

varia entre 18 dias (maio-junho) e 36 dias (agosto-setembro); raças rústicas podem reduzir a cobertura arbustiva em 4 a 8% e aumentar a riqueza específica; a frequência cardíaca aumenta 5% por cada 10% de declive e 3% por cada unidade do índice de temperatura e humidade acima de 70. No entanto, a realidade das montanhas do Norte e Centro de Portugal apresenta cargas animais significativamente mais baixas do que as recomendadas na literatura internacional. Enquanto Dumont et al. (2007) indicam que a carga animal de 1,0 a 1,4 CN/ha permite o equilíbrio ótimo entre a produção animal e os objetivos de conservação da pastagem em sistemas de montanha na Europa Central, as cargas praticadas em Portugal variam entre 0,2 e 0,4 CN/ha em pastagens arbustivas e baldios, e entre 0,8 e 1,2 CN/ha nos lameiros de regadio. Esta disparidade tem implicações profundas para a gestão do território, a prevenção de incêndios e a conservação da paisagem. As principais lacunas de dados incluem a quantificação dos padrões de deslocação, a caracterização da dieta, a avaliação dos efeitos do pisoteio e a influência do abrigo no comportamento das raças Cachena, Maronesa e Barrosã. A investigação futura deve recorrer a tecnologias de precisão (GPS, sensores) para colmatar estas lacunas e avaliar o potencial de aumento da carga animal como ferramenta de gestão da paisagem.

PALAVRAS-CHAVE: comportamento animal; fenologia; GPS tracking; raças autóctones; pastoreio extensivo; pisoteio; encabeçamento.

1. INTRODUÇÃO

As regiões de montanha do Norte e Centro de Portugal, como a Serra da Estrela, o Gerês, o Marão ou Montemuro, definidas como territórios acima dos 700 metros de altitude, caracterizam-se por condicionantes abióticas que restringem as alternativas produtivas. Os invernos rigorosos e prolongados, a secura estival, a reduzida qualidade dos solos e a fraca aptidão agrícola tornam a agricultura intensiva inviável, confiando à pastorícia extensiva um papel central na economia e na gestão do território. As raças bovinas autóctone são, neste contexto, recursos genéticos de valor inestimável, adaptados ao consumo de uma forragem mista de arbustos e plantas herbáceas e a terrenos acidentados.

O pastoreio extensivo de montanha produz externalidades positivas que ultrapassam a esfera produtiva. A atividade pastoril contribui para a manutenção de paisagens em mosaico, para a redução da carga combustível e do risco de incêndio, e para a conservação de habitats e da biodiversidade. Estudos realizados nos Alpes demonstram que o pastoreio com raças como a *Highland cattle*, pode reduzir a cobertura arbustiva em áreas em áreas de montanha entre 4% e 8% e aumentar a diversidade vegetal, mesmo 15 anos após a introdução dos animais (Mochi et al., 2026). Por outro lado, o abandono da pastorícia, verificado nas últimas décadas, conduz à expansão de vegetação arbustiva, ao aumento da biomassa combustível e à perda de diversidade biológica.

No entanto, é fundamental reconhecer que a realidade das montanhas portuguesas apresenta especificidades que a distinguem dos sistemas de montanha da Europa Central, nomeadamente ao nível das cargas animais praticadas. Enquanto a literatura internacional recomenda cargas de 1,0 a 1,4 CN/ha para o equilíbrio entre produção animal e conservação da pastagem (Dumont et al., 2007), as montanhas do Norte e Centro de Portugal operam com cargas significativamente mais baixas, condicionadas pela fraca aptidão agrícola dos solos e pelo clima adverso. Esta disparidade tem implicações profundas para a gestão do território e para a eficácia do pastoreio como ferramenta de prevenção de incêndios.

A gestão eficaz destes sistemas exige, contudo, um conhecimento aprofundado da interação entre o comportamento animal, as condições do terreno, a vegetação e o clima. O presente artigo revisa a literatura existente sobre o comportamento das raças bovinas autóctones em pastoreio extensivo de montanha, identificando conhecimentos consolidados, lacunas de investigação e propondo linhas de investigação futura.

2. METODOLOGIA DE REVISÃO

A presente revisão baseou-se na consulta de bases de dados científicas (Scopus, Web of Science, PubMed) e repositórios institucionais, utilizando combinações de termos como “cattle behaviour”, “mountain pasture”, “grazing behaviour”, “GPS tracking”, “diet selection”, “soil compaction”, “Cachena”, “Maronesa”, “Barrosã” e “autochthonous breeds”. Foram incluídos estudos publicados entre 2003 e 2026, privilegiando aqueles com abordagens quantitativas e metodologias de precisão (GPS, sensores, modelação). Foram adotados como critérios de inclusão: (i) estudos publicados em revistas com revisão por pares; (ii) com dados quantitativos sobre comportamento, dieta, ocupação do espaço ou efeitos do pastoreio; (iii) realizados em sistemas de montanha ou pastagens extensivas. Foram excluídos estudos em sistemas intensivos ou de confinamento e publicações sem revisão por pares.

3. COMPORTAMENTO EM REGIME DE PASTOREIO LIVRE

3.1. ATIVIDADE, RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESLOCAÇÕES

Os estudos sobre comportamento de bovinos em pastoreio extensivo de montanha, embora escassos para as raças específicas do Norte de Portugal, oferece evidências consolidadas para outras regiões e raças. Trabalhos com recurso a sensores GPS e de frequência cardíaca (*biologging*), demonstram que os bovinos dedicam entre

7,2 e 7,7 horas por dia à atividade de pastoreio, com padrões bimodais influenciados pela temperatura e disponibilidade de forragem (Ceppatelli et al., 2024).

Ceppatelli et al. (2024) utilizaram um sistema de biologging com GPS e sensores de frequência cardíaca em seis vacas leiteiras em pastagens alpinas de verão. O sensor GPS alcançou uma eficiência de aquisição de posições superior a 90%, permitindo inferir comportamentos (repouso, pastoreio, deslocação) com elevada precisão. A frequência cardíaca dos animais mostrou variações significativas com o comportamento e a hora do dia, sendo mais elevada durante o pastoreio e a deslocação – com aumentos de 20% a 30% e 40% a 50%, respetivamente, em relação ao repouso – e aumentando com o declive e o índice de temperatura e humidade (THI). Especificamente, a frequência cardíaca aumentou 5% por cada 10% de aumento do declive e 3% por cada unidade do THI acima de 70 (Ceppatelli et al., 2024). Raniolo et al. (2024) confirmaram estes resultados, demonstrando que o sistema é adequado para monitorizar movimentos, comportamento e respostas fisiológicas de bovinos em pastoreio, com uma precisão de posicionamento inferior a 2 metros em céu aberto e 3 metros sob coberto arbóreo. Este tipo de abordagem metodológica poderá ser utilizado para quantificar com precisão o tempo de pastoreio, as distâncias percorridas e os ritmos diários das raças Cachena, Barrosã e Maronesa.

A distância média diária percorrida por bovinos em sistemas de montanha é de cerca de 1,68 km, valor inferior ao registado para ovinos (2,85 km) no mesmo sistema (Kohler et al., 2006). A capacidade de carga da pastagem e a disponibilidade de alimento influenciam o consumo diário, mas a influência direta na distância percorrida não foi detalhada nos resultados disponíveis.

Para as raças do Norte de Portugal, a informação específica é praticamente inexistente. A única exceção é a Maronesa, referenciada em projetos de *rewilding* e conservação, onde os animais, em regime semisselvagem, desenvolvem comportamentos mais próximos de espécies selvagens, como maior elusividade e defesa contra predadores (LIFE-Maronesa, 2025). O estudo com Highland cattle nos Alpes, conduzido por Mochi et al. (2026), mostra que, embora os animais selecionam áreas de pastagem aberta, vão gradualmente entrando em zonas invadidas por arbustos, adaptando-se ao habitat com o tempo. Este dado sugere que o contexto de manejo e a experiência dos animais influenciam significativamente o comportamento, o que deve ser considerado na gestão das raças autóctones portuguesas.

3.2. SELETIVIDADE ALIMENTAR E DIETA

A composição da dieta de bovinos em sistemas de montanha é influenciada pela fenologia da pastagem. O estudo de Dumont et al. (2007), realizado numa pastagem de montanha em França, demonstrou que novilhas selecionam consistentemente dietas dominadas por leguminosas, evitando gramíneas em fase reprodutiva, independentemente da carga animal ou da estação do ano. Os animais apresentaram um padrão típico de “pastoreio em manchas” (*patch grazing*), continuando a pastar áreas previamente utilizadas, mantendo a seleção por manchas de pasto curto de melhor qualidade, especialmente a cargas animais mais baixas. Esta seletividade diminui no final da estação de pastoreio, quando a qualidade da forragem disponível se torna mais homogénea.

Os resultados de Dumont et al. (2007) indicam ainda que, a uma carga animal de 1,0 CN/ha, é possível obter o equilíbrio ótimo entre a produção animal e os objetivos de conservação da pastagem. A uma carga baixa (0,6 CN/ha), a biomassa total permanece elevada e a heterogeneidade da pastagem é mantida, enquanto a uma carga elevada (1,4 CN/ha), a quantidade de forragem disponível no final da estação aproxima-se de níveis limitantes para a performance animal.

No entanto, é fundamental contextualizar estes valores face à realidade das montanhas do Norte e Centro de Portugal. Neste território, a fraca aptidão agrícola dos solos e o clima adverso condicionam significativamente a capacidade de carga das pastagens. Distinguem-se, assim, segundo Aguiar et al., 2009, duas realidades distintas, (i) Pastagens arbustivas e baldios onde a capacidade de carga ronda geralmente os 0,2 a 0,4 CN/ha. Valores superiores provocam sobrepastoreio, aumentando o consumo da vegetação e acelerando a erosão do solo. Esta é a realidade da maioria dos territórios de montanha em Portugal, onde a vegetação espontânea e arbustiva domina a paisagem e (ii) Lameiros (sequeiro/regadio) onde devido à fertilidade superior e ao sistema ancestral de rega, estas pastagens aguentam cargas maiores, situando-se habitualmente entre 0,8 e 1,2 CN/ha durante a época de crescimento da biomassa herbácea. Os lameiros representam, contudo, uma proporção reduzida da superfície total das montanhas portuguesas.

Esta disparidade entre os valores da literatura internacional (0,6 a 1,4 CN/ha) e a realidade portuguesa (0,2 a 0,4 CN/ha em baldios; 0,8 a 1,2 CN/ha em lameiros) apresenta implicações profundas. A pressão de pastoreio na generalidade do território de montanha português é comparativamente muito baixa, o que resulta em subutilização da pastagem, acumulação de biomassa combustível e, consequentemente, maior risco de incêndio. Nas pastagens arbustivas e baldios, a carga real de 0,2 a 0,4 CN/ha é insuficiente para

controlar a vegetação espontânea e reduzir a carga combustível, sendo este um dos fatores que contribui para o aumento do risco de incêndio rural.

Para as raças do Norte de Portugal, a literatura sobre a composição da dieta é omissa. Contudo, a experiência com *Highland cattle*, raça também rústica, indica que a proporção de plantas lenhosas na dieta pode variar entre 15% e 46%, fazendo destes animais uma ferramenta eficaz para contrariar a expansão de arbustos e restaurar a diversidade vegetal de pastagens invadidas por estas espécies, melhorando o valor intrínseco da pastagem (Mochi et al., 2026). A realização de estudos de dieta, utilizando técnicas como a análise de n-alcanos fecais ou a observação direta, seria fundamental para caracterizar a seletividade alimentar sazonal das raças bovinas de montanha, especialmente tendo em conta a baixa pressão de pastoreio e a necessidade de avaliar o potencial destas raças para o controlo da vegetação arbustiva.

4. UTILIZAÇÃO E PROCURA DE ZONAS DE ÁGUA E ABRIGO

A distribuição dos animais no terreno não é aleatória, sendo a procura por água e abrigo um dos fatores determinantes para a ocupação do espaço. Estudos com GPS mostram que os bovinos preferem áreas próximas a pontos de água, especialmente em períodos de seca (Kohler et al., 2006), e que a frequência cardíaca aumenta 3% por cada unidade do THI acima de 70, refletindo o stress térmico e a consequente procura de água e sombra (Ceppatelli et al., 2024).

Para as raças em análise, não existem estudos que quantifiquem a frequência de visita a pontos de água ou que avaliem a influência da proximidade a água no comportamento das raças Cachena, Barrosã ou Maronesa. No contexto das montanhas portuguesas, com cargas animais baixas (0,2 a 0,4 CN/ha em baldios), a distribuição dos animais pode ser ainda mais influenciada pela localização de pontos de água, uma vez que a baixa densidade de animais pode levar a uma ocupação mais dispersa e seletiva do território.

A procura de abrigo, seja contra intempéries (frio, vento) ou contra a insolação intensa, é menos documentada. A presença de bosques ou formações arbustivas pode oferecer refúgio aos animais, sendo este um aspeto particularmente relevante em sistemas de montanha, onde as condições climáticas são adversas. O projeto LIFE-Maronesa (2025) prevê que os animais em regime extensivo necessitem de “refúgios para o frio ou para as inclemências do sol”, sugerindo que a vegetação arbórea e arbustiva desempenha esta função. Os estudos com *Highland cattle*, ao documentarem a entrada progressiva dos animais em áreas de arbustos, sugerem que estas áreas podem servir

simultaneamente como fonte de alimento e como abrigo (Mochi et al., 2026). A influência do abrigo no comportamento e no bem-estar das raças bovinas de montanha permanece, contudo, por investigar.

5. PADRÕES DE OCUPAÇÃO DO ESPAÇO

Os padrões de ocupação do espaço são moldados por fatores topográficos, pela disponibilidade de recursos e pela gestão humana. O estudo de Kohler et al. (2006) numa pastagem arborizada de montanha, revelou que os diferentes efeitos do pastoreio (remoção de forragem, deposição de fezes, pisoteio) apresentam padrões espaciais distintos e são correlacionados com diferentes variáveis ambientais. A remoção de forragem mostrou uma forte correlação com a gestão e com a presença de estruturas antropogénicas, enquanto os padrões de pisoteio e de deposição de fezes foram mais influenciados por variáveis naturais, como a topografia. As correlações entre os diferentes efeitos do gado não foram significativas, sugerindo que modelos de gestão que tratam a pressão de pastoreio como uma variável única podem ser insuficientes para descrever a complexidade da interação animal-vegetação. Os padrões espaciais enfraqueceram ao longo da estação para o pastoreio e o pisoteio, enquanto os padrões de deposição de fezes se mantiveram relativamente estáveis.

Em sistemas extensivos portugueses, as áreas efetivamente pastoreadas podem ser inferiores a 5% da área total do prado, evidenciando uma forte heterogeneidade na ocupação do espaço (Duarte, 2022). Esta realidade é particularmente relevante no contexto das montanhas do Norte e Centro de Portugal, como exposto já anteriormente, onde as cargas animais são baixas e a vegetação arbustiva ocupa vastas extensões, resultando numa pressão de pastoreio difusa e concentrada em áreas específicas (ex: lameiros, zonas planas, proximidade a água). A literatura com recurso a estudos com GPS mostra que os bovinos preferem terrenos planos ou de baixo declive, evitando áreas íngremes. Contudo, raças adaptadas à montanha, como a Tarentaise nos Alpes, demonstram maior aptidão para utilizar terrenos acidentados. Este dado sugere que as raças Cachena, Maronesa e Barrosã, historicamente selecionadas para serras como o Gerês, o Marão e o Alvão, poderão apresentar uma maior tolerância a declives do que raças de planície. Os estudos com Highland cattle mostram que os animais se movem preferencialmente em áreas de pastagem, mas que, com o tempo, vão explorando zonas arbustivas, sugerindo uma adaptação gradual ao habitat (Mochi et al., 2026).

6. EFEITOS DO PISOTEIO NO TERRENO E NA VEGETAÇÃO

O pisoteio dos bovinos constitui um dos principais mecanismos de impacto sobre a estrutura do solo e a vegetação em sistemas de pastoreio extensivo. A compactação do solo, definida como o aumento da densidade aparente e a redução da porosidade, afeta negativamente o arejamento, a infiltração de água e o crescimento radicular, comprometendo a produtividade da pastagem e a ciclagem de nutrientes (Soane & Van Ouwerkerk, 1995). A quantificação da compactação do solo utiliza indicadores como a densidade aparente, a resistência à penetração (Cone Index, CI), a capacidade de arejamento e a condutividade hidráulica saturada, sendo que os valores críticos variam com o tipo de solo, o teor de matéria orgânica e as condições climáticas locais (Lipiec & Hatano, 2003). Richer-de-Forge et al. (2024) demonstraram a utilidade das observações de campo para avaliar o comportamento do solo à compactação, propondo indicadores que relacionam a densidade aparente e o teor de argila para definir classes de limitação ao enraizamento.

Em ecossistemas mediterrânicos como o Montado, Serrano et al. (2023) quantificaram o efeito do pisoteio de bovinos (raças Mertolenga e Alentejana) utilizando o Cone Index (CI) como indicador de compactação. O estudo revelou que o pisoteio resultou numa compactação significativa do solo fora da copa das árvores (OTC) nas três camadas consideradas (0–0,10 m; 0,10–0,20 m; 0,20–0,30 m) e em todas as datas de avaliação. Sob a copa das árvores (UTC), o efeito do pisoteio foi significativo apenas na camada superficial (0–0,10 m), com uma tendência para maior CI em profundidades superiores a 0,10 m em zonas com menor presença animal. Estes resultados sugerem que a copa das árvores exerce um efeito protetor sobre o solo, provavelmente devido à acumulação de matéria orgânica e ao suporte estrutural proporcionado pelas raízes (Serrano et al., 2023). Os mesmos autores verificaram que o CI se correlacionou significativamente com o teor de humidade do solo (SMC) e com a condutividade elétrica aparente (ECa), demonstrando o potencial da utilização de ferramentas de agricultura de precisão para monitorizar a compactação. Além disso, o estudo de Serrano et al. (2026) confirmou que a humidade do solo tem um efeito negativo e significativo no CI ($r = -0,381$; $p < 0,05$), indicando que solos mais húmidos são mais vulneráveis à compactação pelo pisoteio. De forma análoga, De Souza et al. (2026), estudando solos sob carvalho (*Quercus pyrenaica* e *Q. rotundifolia*) no Parque Natural de Montesinho, concluíram que o pastoreio tem efeitos significativos na compactação, particularmente em solos rasos (Leptosolos) característicos das montanhas do Nordeste de Portugal.

O estudo de Kohler et al. (2006) numa pastagem arborizada de montanha na Suíça demonstrou que o pisoteio é um dos efeitos dos animais com padrões espaciais próprios, que se enfraquecem ao longo da estação de pastoreio, e que não está correlacionado com a intensidade da remoção de forragem. Isto sugere que as áreas mais pisoteadas não são necessariamente as mais pastadas, podendo corresponder a zonas de passagem ou de concentração de animais (ex: junto a pontos de água, portões, zonas de sombra). A literatura confirma que a pressão estática exercida por uma vaca é de cerca de 160–190 kPa, podendo ser significativamente superior durante o movimento, quando nem todos os cascos estão em contacto com o solo (Serrano et al., 2023; Drewry et al., 2008; Jordon, 2009). Este valor é consideravelmente superior ao exercido por ovinos (aproximadamente 80 kPa), o que torna os bovinos agentes de compactação particularmente relevantes.

Em pastagens de montanha na Áustria, o pisoteio intensivo de bovinos levou a uma compactação substancial do solo, à deterioração da sua estrutura e a alterações na composição de espécies vegetais (EGU, 2015). Stankovičová et al. (2008), numa pastagem de montanha na Eslováquia (altitude 920 m), verificaram que a resistência à penetração aumenta com a profundidade e que o pisoteio animal cria zonas excessivamente compactas, particularmente a profundidades de 0,70–1,05 m, que impedem a drenagem. Ludvíková et al. (2014), numa experiência de 12 anos em pastagem temperada, demonstraram que o pastoreio a longo prazo por grandes herbívoros tem um efeito significativo na compactação do solo, com valores mais baixos no tratamento “sem pisoteio”. As espécies formadoras de comunidades de pastagem dependem essencialmente de dois tipos de distúrbio: a desfolhação regular pelo pastoreio e o pisoteio regular pelos cascos, causando elevado grau de compactação do solo e rutura do coberto herbáceo (Ludvíková et al., 2014). Adicionalmente, Blanco-Sepúlveda et al. (2024) concluíram que a densidade aparente e a capacidade de infiltração são as propriedades-chave para identificar áreas afetadas pelo pisoteio em sistemas de montanha mediterrânicos, embora a relação com a carga animal não seja linear e dependa de fatores ambientais.

A aplicação de tecnologias de precisão tem revolucionado a monitorização dos efeitos do pisoteio. Serrano et al. (2023) e Serrano et al. (2024) demonstraram a utilidade da combinação de sensores de Cl, ECa, GPS collars e NDVI (a partir de imagens Sentinel-2) para avaliar o efeito do pisoteio. O NDVI mostrou potencial para monitorizar o efeito do pisoteio durante a fase de pico de produção da pastagem na primavera, com maior vigor vegetativo em áreas com menor pisoteio (Serrano et al., 2023). O estudo de Serrano et al. (2026) acrescenta que a aplicação de calcário dolomítico em sistemas silvopastoris pode mitigar os efeitos da compactação, melhorando as propriedades físicas do solo.

Nas condições específicas das montanhas do Norte e Centro de Portugal, com cargas animais entre 0,2 e 0,4 CN/ha em baldios, o efeito do pisoteio é provavelmente menos acentuado do que em sistemas com cargas mais elevadas, uma vez que a baixa densidade de animais reduz a pressão direta sobre o solo (Serrano et al., 2023; 2026). No entanto, a concentração dos animais em áreas específicas, próximas a água, lameiros, zonas planas, locais de sombra, pode criar focos de compactação localizada, mesmo com cargas globais baixas (Kohler et al., 2006; Serrano et al., 2023). Nos lameiros, onde as cargas são mais elevadas (0,8 a 1,2 CN/ha), o efeito do pisoteio pode ser mais significativo, especialmente em períodos de maior humidade, quando a vulnerabilidade do solo à compactação é máxima (Stankovičová et al., 2008; Serrano et al., 2023). Este fenómeno é particularmente relevante em sistemas de montanha, onde o solo está frequentemente saturado durante os meses de outono e inverno.

Para as raças Cachena, Barrosã e Maronesa, não existem estudos específicos sobre os efeitos do pisoteio. Esta é uma das lacunas mais significativas identificadas. A literatura existente sugere, no entanto, que raças de menor produtividade, como a Highland Cattle, exercem menor pressão estática sobre o solo devido à relação mais favorável entre o peso corporal e a área do casco (Pauler et al., 2020; Serrano et al., 2023). Serrano et al. (2023) estimaram que, para as raças Mertolenga (400 kg) e a Alentejana (600 kg), a pressão estática exercida em cada ponto de contacto é de aproximadamente 100 a 150 kPa, valor que pode ser significativamente ultrapassado durante o movimento. Estes dados sugerem que raças mais leves, como a Cachena, poderão ter um impacto de pisoteio inferior ao de raças mais pesadas, como a Barrosã e a Maronesa.

Esta revisão recomenda a realização de estudos específicos para as raças autóctones portuguesas, utilizando metodologias como a medição da resistência à penetração (Cone Index), a densidade aparente e a infiltração de água, em áreas com diferentes intensidades de uso, considerando a topografia, o tipo de solo, a estação do ano e a humidade do solo. A integração de tecnologias de precisão (GPS, sensores de ECa, imagens de satélite) permitirá uma monitorização detalhada e uma gestão sustentável do pastoreio, minimizando os efeitos negativos do pisoteio e promovendo a conservação da paisagem (Serrano et al., 2023; 2024; 2026; De Souza et al., 2026).

7. COMPORTAMENTO FENOLÓGICO E SAZONAL DA PASTAGEM

A fenologia da pastagem, ou seja, o ciclo de crescimento e maturação das plantas, é o principal fator que molda o comportamento alimentar dos bovinos em sistemas de montanha. A estação de crescimento é limitada pela altitude e pelo clima, iniciando-se na

primavera e prolongando-se até ao verão, e uma segunda estação com início no outono até ao começo do inverno. Com a maturação da pastagem, a qualidade nutricional diminui, levando os animais a ajustar a dieta e o tempo de pastoreio. O estudo de Dumont et al. (2007) mostra que a seleção por manchas de pasto curto diminui no final da estação, com os animais a apresentarem menor seletividade quando a oferta de forragem de qualidade é reduzida. A carga animal influencia este processo: a uma carga baixa (0,6 CN/ha), a biomassa total permanece elevada e a heterogeneidade da pastagem é mantida, enquanto a uma carga elevada (1,4 CN/ha), a quantidade de forragem disponível no final da estação se aproxima de níveis limitantes para a performance animal (Dumont et al., 2007).

As montanhas do Norte e Centro de Portugal, nomeadamente nos baldios, a biomassa total permanece elevada durante toda a estação, contribuindo para a acumulação de combustível e para o risco de incêndio. Este é um dos principais desafios da gestão das pastagens de montanha em Portugal: a carga animal é insuficiente para consumir a biomassa produzida, resultando num excedente de matéria seca que se acumula e aumenta a probabilidade de ocorrência e propagação de incêndios rurais.

Voisin (1959), na sua obra *Grass Productivity*, estabeleceu os princípios fundamentais para a gestão sazonal da pastagem, demonstrando que o período de descanso entre pastoreios não é fixo, mas deve variar com a estação. Na região da Normandia, Voisin observou que o período de descanso ideal poderia ser de 14 a 18 dias em maio, mas de 28 a 36 dias no final de julho e agosto, devido à desaceleração do crescimento da pastagem. Este princípio da variação sazonal do período de descanso é fundamental para a gestão de pastagens em montanha, embora a sua aplicação em sistemas com cargas tão baixas como as praticadas em Portugal exija uma adaptação significativa.

A transumância, movimento sazonal entre pastagens de inverno (vale, lameiros) e de verão (montanha), é um sistema tradicional de gestão que otimiza a exploração da fenologia da pastagem. Nas regiões de montanha do Norte e Centro de Portugal, este sistema é referido como uma forma ancestral de pastoreio. Para as raças Cachena, Barrosã e Maronesa, a transumância é uma prática histórica, embora atualmente em declínio. A compreensão da dinâmica fenológica é essencial para definir cargas animais adequadas e evitar o sobrepastoreio ou a subutilização dos recursos forrageiros.

8. CRITÉRIOS PARA A CONSIDERAÇÃO DE DUAS ÉPOCAS SAZONAIS

Existem diferenças claras no comportamento de pastoreio entre o verão e o inverno, ou entre a estação seca e a estação chuvosa. Para a gestão dos sistemas de

montanha do Norte e Centro de Portugal, a divisão em duas épocas – “**estação de crescimento**”(primavera/outono) e “**estação de dormência**” (verão/inverno) – é mais relevante do que as quatro estações convencionais. Esta divisão é particularmente importante no contexto português, onde a fenologia da pastagem é marcada por um período de crescimento ativo durante a primavera, início do verão e outono, e por um período de dormência ou senescência durante o verão seco e o inverno rigoroso.

Os critérios para esta divisão devem basear-se em indicadores ecológicos e de gestão, nomeadamente, na **disponibilidade de biomassa**: período em que a pastagem apresenta crescimento ativo (vegetativo) versus período em que a pastagem está seca ou dormente. Voisin (1959) quantificou esta diferença, indicando que o período de descanso ótimo é de 14 a 18 dias durante o crescimento ativo (maio-junho) e de 28 a 36 dias durante o crescimento lento (agosto-setembro). Nas montanhas do Norte e Centro de Portugal, onde as cargas animais são baixas, em particular nas áreas de baldio, a pressão de pastoreio é insuficiente para consumir a biomassa produzida, resultando num excedente de matéria seca que contribui para a carga combustível. Esta realidade exige uma gestão diferenciada, que considere a necessidade de aumentar a pressão de pastoreio durante a estação de crescimento para reduzir a biomassa acumulada.

Na qualidade nutricional, o teor de proteína bruta e fibra da pastagem, que determina o valor forrageiro e influencia a seletividade alimentar dos animais. Dumont et al. (2007) demonstraram que a seletividade dos animais é elevada durante o período de crescimento ativo e diminui no final da estação, quando a qualidade da forragem se torna mais homogênea. Esta redução da seletividade no final da estação pode ser uma oportunidade para o pastoreio de áreas com vegetação mais madura e arbustiva.

As condições climáticas, com variações de temperatura e humidade, afetam o bem-estar animal e a procura de água e abrigo (Ceppatelli et al., 2024; Kohler et al., 2006). No contexto das montanhas portuguesas, o clima é marcado por verões quentes e secos e invernos frios e húmidos, o que influencia significativamente o comportamento dos animais e a gestão do pastoreio.

A definição das épocas sazonais é fundamental para o planeamento do pastoreio e para a definição de cargas animais adequadas, permitindo sincronizar a oferta forrageira com as necessidades nutricionais dos animais e minimizar o impacto do pisoteio em períodos críticos. No contexto específico das montanhas do Norte e Centro de Portugal, onde as cargas animais são baixas, a gestão sazonal deve focar-se não na prevenção do sobrepastoreio, mas na otimização do consumo da biomassa disponível para reduzir a carga combustível e o risco de incêndio, aliada a esta sazonalidade, deve ainda ser

tomada em conta a gestão da manada, época de cio, desmame e necessidade de suplementação alimentar. A gestão sazonal deve considerar as necessidades nutricionais específicas dos animais em diferentes fases do ciclo produtivo.

9. INTERAÇÃO ENTRE COMPORTAMENTO ANIMAL, CONDIÇÕES DO TERRENO, VEGETAÇÃO E CLIMA

A interação entre os fatores ecológicos e o comportamento animal é complexa e dinâmica. A topografia (declive, exposição), a vegetação (produtividade, composição botânica) e o clima (temperatura, precipitação) atuam em conjunto, moldando a distribuição dos animais, a sua dieta e o seu bem-estar. A literatura sugere que o declive e a produtividade da vegetação são os principais impulsionadores da distribuição dos bovinos. A disponibilidade de água e a presença de abrigo são fatores moduladores, especialmente em condições climáticas adversas.

O estudo de Kohler et al. (2006) evidencia que os diferentes efeitos do gado – pastoreio, pisoteio e deposição de fezes – estão correlacionados com diferentes variáveis ambientais e que os padrões espaciais se alteram ao longo da estação. Por exemplo, os padrões de pisoteio enfraquecem ao longo da estação, enquanto os padrões de deposição de fezes se mantêm relativamente estáveis. A remoção de forragem está mais fortemente correlacionada com variáveis de gestão (ex: presença de estruturas, proximidade a água), enquanto o pisoteio pode estar mais relacionado com a topografia e a dinâmica de deslocação dos animais. Estas diferenças sistemáticas nos padrões espaciais dos efeitos do gado podem resultar em interações complexas com a vegetação, com implicações para a ciclagem de nutrientes e a regeneração da vegetação, especialmente em paisagens heterogêneas como as pastagens arborizadas de montanha (Kohler et al., 2006).

No contexto específico das montanhas do Norte e Centro de Portugal, a interação entre o pastoreio e o risco de incêndio assume particular relevância. A baixa carga animal e a elevada biomassa vegetal acumulada criam condições propícias à ocorrência de incêndios rurais, que têm devastado vastas áreas da paisagem montanhosa nas últimas décadas.

A experiência com *Highland cattle* mostra que raças rústicas podem reduzir a cobertura arbustiva, aumentar a diversidade vegetal e melhorar o valor nutricional da pastagem, especialmente quando introduzidas a longo prazo e com adaptação gradual ao habitat. Mochi et al. (2026) demonstraram uma redução de 8% na cobertura arbustiva em Val Vogna (Itália) e de 4% em Bovonne (Suíça) após a introdução dos animais,

acompanhada de aumentos significativos na riqueza específica e no valor nutricional das pastagens abertas. Nas montanhas do Norte e Centro de Portugal, este efeito de redução da cobertura arbustiva pode ser menos pronunciado, devido à baixa carga animal, sendo necessário um aumento da pressão de pastoreio ou a introdução de outras espécies (ex: caprinos) para controlar a expansão de arbustos. A gestão humana, através da instalação de bebedouros, cercas e manjedouras, bem como a definição da carga animal e do período de pastoreio, atua como um fator modulador que pode atenuar ou acentuar estas interações. A utilização estratégica do pastoreio, com cargas animais adequadas e gestão sazonal, pode contribuir para a redução da carga combustível, a prevenção de incêndios e a conservação da biodiversidade nas montanhas portuguesas.

10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA

A presente revisão evidencia que, para as raças bovinas de montanha autóctones portuguesas, a literatura específica é muito limitada. A maioria das evidências provém de estudos com outras raças ou outros sistemas de montanha, como os realizados nos Alpes. A Maronesa, por ser utilizada em projetos de *rewilding* e de conservação, é a raça com alguma informação comportamental disponível (LIFE-Maronesa, 2025), embora ainda insuficiente e sem dados quantitativos. Os efeitos do pisoteio, os padrões de ocupação do espaço, a procura de água e abrigo, e a interação integrada entre comportamento animal, vegetação, terreno e clima são as maiores lacunas identificadas.

É particularmente relevante salientar a disparidade entre as cargas animais recomendadas na literatura internacional (1,0 CN/ha para equilíbrio produção/conservação) e as praticadas nas montanhas do Norte e Centro de Portugal (0,2 a 0,4 CN/ha em baldios; 0,8 a 1,2 CN/ha em lameiros). Esta diferença substancial implica que, no contexto português, a pressão de pastoreio na generalidade do território é muito baixa, resultando em subutilização da pastagem, acumulação de biomassa combustível e, consequentemente, maior risco de incêndio. A investigação futura deve avaliar se o aumento da carga animal para valores mais próximos do ótimo ecológico (0,8 a 1,0 CN/ha) seria viável e benéfico para o manejo animal, para a gestão da paisagem e, por conseguinte, para a prevenção de incêndios.

Com base nesta análise, recomendam-se as seguintes linhas de investigação futura:

Estudos de Telemetria, com coleiras GPS e sensores de frequência cardíaca para quantificar os padrões de deslocação, as áreas de vida, a preferência topográfica e os ritmos diários dos animais, avaliando a influência da estação do ano e da disponibilidade

de recursos. A tecnologia de biologging permite monitorizar a resposta fisiológica dos animais a condições climáticas adversas, como o aumento do índice de temperatura e humidade (Ceppatelli et al., 2024). Estes estudos são particularmente importantes para compreender como os animais se distribuem no território em função da baixa carga animal e da heterogeneidade da paisagem.

Caracterização da Dieta, estudando a composição da dieta, utilizando técnicas como a análise de n-alcanos fecais ou a observação direta, para determinar a seletividade alimentar sazonal e a preferência por espécies forrageiras, seguindo a metodologia de Dumont et al. (2007), que demonstrou que a seletividade é elevada a cargas animais de 1,0 CN/ha e diminui no final da estação. No contexto português, com cargas mais baixas, é fundamental avaliar o potencial das raças autóctones para o consumo de vegetação arbustiva e a redução da carga combustível.

Avaliação do Pisoteio, medindo a compactação do solo (resistência à penetração, densidade aparente, infiltração de água) e o impacto na vegetação (composição botânica, biomassa) em áreas com diferentes intensidades de uso, considerando os indicadores propostos por Lipiec e Hatano (2003) e Richer-de-Forges et al. (2024), que relacionam a densidade aparente e o teor de argila para definir classes de limitação ao enraizamento. É importante avaliar o impacto do pisoteio em lameiros (cargas mais elevadas) e baldios (cargas mais baixas) para compreender os efeitos diferenciados da carga animal no solo.

Modelos Integradores, desenvolvendo-se modelos que integrem dados de comportamento animal, vegetação, topografia e clima para prever a distribuição dos animais e apoiar a gestão sustentável do território, seguindo a abordagem de Kohler et al. (2006) que distingue os diferentes efeitos do gado (pastoreio, pisoteio, deposição de fezes) e demonstrou que estes apresentam padrões espaciais distintos e não correlacionados. Estes modelos devem considerar especificamente as baixas cargas animais e a elevada biomassa vegetal características das montanhas portuguesas.

Estudos de avaliação do bem-Estar das raças autóctones bovinas de montanha em diferentes sistemas de manejo, considerando a influência do abrigo, da disponibilidade de água e da interação com predadores, utilizando indicadores de saúde, comportamentais e fisiológicos como a frequência cardíaca, entre outros (Ceppatelli et al., 2024; Raniolo et al., 2024).

Estudos sobre Carga Animal e Prevenção de Incêndios, avaliando o potencial de aumento da carga animal nas pastagens arbustivas e baldios para valores mais próximos do ótimo ecológico e o impacto na redução da biomassa combustível. Estes estudos são fundamentais para fundamentar políticas de gestão do território e de prevenção de incêndios.

A investigação futura deve ainda considerar a comparação entre as três raças (Cachena, Maronesa e Barrosã), procurando identificar diferenças adaptativas que possam orientar a escolha da raça mais adequada para cada contexto de montanha. A implementação de abordagens de pecuária de precisão, com recurso a sistemas de monitorização remota, pode otimizar a gestão do pastoreio, conciliando a produção animal com a conservação da paisagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, C., et al. (2009). Montanha. In: Pereira, H.M. et al. (Eds.), *Ecossistemas e Bem-Estar Humano: Avaliação para Portugal do Millennium Ecosystem Assessment*. Lisboa: Escolar Editora.

Blanco-Sepúlveda, R., Gómez-Moreno, M. L., & Lima, F. (2024). *An Approach to the Key Soil Physical Properties for Assessing Soil Compaction Due to Livestock Grazing in Mediterranean Mountain Areas*. Sustainability.

Ceppatelli, A., Raniolo, S., Berton, M., et al. (2024). *Precision livestock farming tools for monitoring dairy cattle behaviour on mountain pastures*. 32nd International Symposium Animal Science Days 2024.

De Souza, J. H. G., Mosquera-Losada, M., & Castro, M. (2026). *Grazing effects on soil compaction in mediterranean oak woodlands*. Agroforestry Systems.

Drewry, J. J., Cameron, K. C., & Buchan, G. D. (2008). *Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing — a review*. Australian Journal of Soil Research.

Duarte, J. M. C. P. (2022). *Comparação da variação sazonal da pressão de pastoreio de bovinos Mertolengos e Alentejanos* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Évora.

Dumont, B., Garel, J. P., Ginane, C., et al. (2007). *Effect of cattle grazing a species-rich mountain pasture under different stocking rates on the dynamics of diet selection and sward structure*. Animal.

EGU General Assembly Conference Abstracts. (2015). *Impact of cattle grazing on soil and vegetation - a case study in a mountainous region of Austria*.

Jordon, D. (2009). *Soil compaction and livestock trampling*. Teagasc, Ireland.

Kohler, F., Gillet, F., Reust, S., et al. (2006). *Spatial and seasonal patterns of cattle habitat use in a mountain wooded pasture*. Landscape Ecology.

LIFE-Maronesa. (2025). Mitigação da armadilha do fogo e da oligotrofia nas montanhas do NO de Portugal continental. *ForestWISE*.

Lipiec, J., & Hatano, R. (2003). *Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth*. Geoderma, 116(1-2), 107-136.

Ludvíková, V., Pavlu, V., Gaisler, J., Pavlu, L., & Hejcman, M. (2014). *Effect of long term defoliation by cattle grazing with and without trampling on soil compaction and plant species composition in temperate grassland*. Proceedings of the Joint Meeting of the "Mountain Pastures, Mediterranean Forage Resources (FAO-CIHEAM) and Mountain Cheese" networks. Clermont-Ferrand, France.

Mochi, L. S., Pittarello, M., Schneider, M. K., et al. (2026). *Highland cattle grazing reduces shrubland cover and increases plant diversity in green alder-encroached pastures*. Agriculture, Ecosystems & Environment.

Pauler, C., Isselstein, J., Berard, J., Braunbeck, T., & Schneider, M. (2020). *Grazing Allometry: Anatomy, Movement, and Foraging Behavior of Three Cattle Breeds of Different Productivity*. Frontiers in Veterinary Science.

Pinheiro Machado Filho, L. C., Seó, H. L. S., Daros, R. R., Enriquez-Hidalgo, D., Wendling, A. V., & Pinheiro Machado, L. C. (2021). *Voisin Rational Grazing as a Sustainable Alternative for Livestock Production*. Animals.

Raniolo, S., Ceppatelli, A., Berton, M., et al. (2024). *Suitability of a commercial low-cost biologging system for monitoring movement, behaviour and heart rate of grazing dairy cows*. Italian Journal of Animal Science.

Richer-de-Forges, A. C., Arrouays, D., Libohova, Z., et al. (2024). *Revealing Topsoil Behavior to Compaction from Mining Field Observations*. Land.

Serrano, J., Marques, J., Shahidian, S., Carreira, E., Marques da Silva, J., Paixão, L., Paniagua, L.L., Moral, F., Ferraz de Oliveira, I., & Sales-Baptista, E. (2023). *Sensing and Mapping the Effects of Cow Trampling on the Soil Compaction of the Montado Mediterranean Ecosystem*. Sensors.

Serrano, J., Shahidian, S., Carreira, E., Moral, F., Paniagua, L., Charneca, R., & Pereira, A. (2026). *Soil Compaction in Montado Mediterranean Ecosystem: Dolomitic Limestone Application, Sheep Grazing Management and Tree Effects*. Sustainability.

Serrano, J., Shahidian, S., Marques da Silva, J., Paniagua, L., Moral, F., & Stafford, J. (2024). *Technological approach to evaluate the livestock trampling effect on soil compaction*. FAO AGRIS.

Soane, B. D., & Van Ouwerkerk, C. (1995). *Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth*. Geoderma.

Stankovičová, K., Novák, J., Bajla, J., & Chlpík, J. (2008). *Penetration Resistance of Soil on the Year-Long Using Mountain Pasture by the Cattle*. Journal of Central European Agriculture.

Voisin, A. (1959). *Grass Productivity*. Philosophical Library, New York.

CAPÍTULO 11

REMATE GANADERO DE PEQUEÑOS PRODUCTORES: MÉTODO DE EVALUACIÓN FODA¹

Data de submissão: 21/08/2026

Data de aceite: 10/09/2026

Félix Cavour Ferrari

Instituto Nacional Tecnología Agropecuaria
Buenos Aires, Argentina
<https://orcid.org/0009-0004-8171-8731>

María Elena Fretes

Instituto Nacional Tecnología Agropecuaria
Buenos Aires, Argentina

José Braulio Silvero

Instituto Nacional Tecnología Agropecuaria
Buenos Aires, Argentina

RESUMEN: Los remates ganaderos para pequeños productores en Mercedes, Corrientes (2005 – 2019), entendidos como estrategias intersectoriales tendientes al desarrollo local, han logrado que los usuarios se involucren con la adopción de tecnologías de producción y metodologías de organización. Esta estrategia de abordaje planteada en sus inicios por organismos del Estado como instituciones cooperantes INTA Mercedes y el Ministerio de la Producción de la provincia

de Corrientes², y los productores organizados en la Asociación de Consejo de desarrollo local del Centro sur Correntino, han efectuado acciones en la búsqueda de soluciones relacionadas a una mejor inserción de este estrato de productores al mercado ganadero, motivando a mejorar las producciones individuales, y que agrupados puedan lograr la escala necesaria para afrontar a los mercados y sus demandas. Los pilares de la estrategia se centraron en promover la participación, la cooperación, la solidaridad, el asociativismo, el empleo de tecnología disponible para la escala productiva, en la búsqueda de mejores ingresos y de mayor rentabilidad, con apoyo del Estado (con financiamiento, capacitación, asesoramiento), buscando alcanzar el desarrollo de las capacidades de las personas, comunidades, y sociedades suponiendo el bienestar de cada una de las partes. Uno de los desafíos de la agencia de extensión INTA Mercedes es poder visualizar los logros alcanzados a partir de indicadores cuantitativos y cualitativos, utilizando la herramienta FODA que permitirá obtener una visión tanto externa como interna de la organización y que la información analizada

² Uno de los organismos que promovió inicialmente este proyecto fue el PRODERNEA dependiente del Ministerio de Producción trabajo y Turismo de Corrientes. Al finalizar este programa se continuó trabajando en el mismo proyecto con la UPDR (Unidad Provincial de Desarrollo Rural) creada por el mismo Ministerio, y en los últimos años se lo ejecuta a través del IDERCOR (Instituto de Desarrollo Rural de Corrientes). En el transcurso del trabajo se observará la función de este organismo en este proyecto.

¹ Presentado anteriormente en evento AADER.

contribuya a un sistema de seguimiento y evaluación que permita conocer el éxito o el fracaso de la propuesta.

PALABRAS CLAVES: pequeños productores; remates ganaderos; comercialización; análisis FODA; extensión rural.

LEILÃO DE GADO DE PEQUENOS PRODUTORES: MÉTODO DE AVALIAÇÃO SWOT

RESUMO: Os leilões de gado para pequenos produtores em Mercedes, Corrientes (2005–2019), entendidos como estratégias intersetoriais voltadas ao desenvolvimento local, têm contribuído para que os participantes se envolvam com a adoção de tecnologias de produção e metodologias de organização. Essa estratégia de abordagem, inicialmente proposta por órgãos do Estado, como o INTA Mercedes e o Ministério da Produção da Província de Corrientes, juntamente com os produtores organizados na Associação do Conselho de Desenvolvimento Local do Centro-Sul Correntino, desenvolveu ações em busca de soluções relacionadas a uma melhor inserção desse segmento de produtores no mercado pecuário, incentivando a melhoria das produções individuais e, de forma associada, a obtenção da escala necessária para atender aos mercados e às suas demandas. Os pilares da estratégia concentraram-se na promoção da participação, da cooperação, da solidariedade, do associativismo e do uso de tecnologias disponíveis e adequadas à escala produtiva, na busca por melhores rendimentos e maior rentabilidade, com o apoio do Estado por meio de financiamento, capacitação e assistência técnica. O objetivo foi promover o desenvolvimento das capacidades das pessoas, comunidades e sociedades, tendo como pressuposto o bem-estar de cada uma das partes envolvidas. Um dos desafios da Agência de Extensão do INTA Mercedes é visualizar os resultados alcançados por meio de indicadores quantitativos e qualitativos, utilizando a ferramenta SWOT (FOFA), que permitirá obter uma visão tanto externa quanto interna da organização. Dessa forma, as informações analisadas poderão contribuir para um sistema de acompanhamento e avaliação que permita conhecer o sucesso ou o fracasso da proposta.

PALAVRAS-CHAVE: pequenos produtores; leilões de gado; comercialização; análise SWOT (FOFA); extensão rural.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos de la extensión de INTA es poder exponer sus resultados (productos- efectos e impactos), donde el monitoreo y la evaluación son esenciales para poder reconocer los esfuerzos realizados y si han tenido éxito o han fracasado en sus acciones. La mayoría de los sistemas de seguimiento y evaluación de proyectos de desarrollo rural se efectúan por exigencias externas a los ejecutores, en dichos sistemas, el monitoreo busca la incorporación de la visión de los diferentes agentes y que la evaluación asuma un carácter concientizador.

Los “Remates ganaderos para pequeños productores” en Mercedes, Corrientes (2005 – 2019), son remates feria entendidos como estrategias intersectoriales y

procesos innovadores tendientes al desarrollo local, que han logrado que los usuarios se involucren con la adopción de tecnologías de producción y metodologías de organización. Esta estrategia de abordaje planteada en sus inicios por organismos del Estado como instituciones cooperantes, INTA Mercedes y el Ministerio de la Producción de la provincia de Corrientes, y los productores organizados en la Asociación de Consejo de desarrollo local del Centro sur Correntino, han efectuado acciones en la búsqueda de soluciones relacionadas a una mejor inserción de este estrato de productores al mercado ganadero, motivando a mejorar las producciones individuales, y que agrupados puedan lograr la escala necesaria para afrontar a los mercados y sus demandas. Los pilares de la estrategia se centraron en promover la participación, la cooperación, la solidaridad, el asociativismo, el empleo de tecnología disponible para la escala productiva, en la búsqueda de mejores ingresos y de mayor rentabilidad, con apoyo del Estado (con financiamiento, capacitación, asesoramiento), buscando alcanzar el desarrollo de las capacidades de las personas, comunidades, y sociedades suponiendo el bienestar de cada una de las partes.

Otro de los desafíos de la agencia de extensión rural del INTA Mercedes es poder visualizar los logros alcanzados a partir de indicadores cuantitativos y cualitativos, utilizando la herramienta FODA que permitirá obtener una visión tanto externa como interna de la organización y que la información analizada contribuya a un sistema de seguimiento y evaluación que permita conocer el éxito o el fracaso de la propuesta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. METODOLOGÍA FODA PARA VISUALIZAR RESULTADOS

Existe una relación muy estrecha entre un proyecto y la estrategia que este debe formular e implementar las planificaciones operativas para visualizar el entorno en el que el proyecto se desenvuelve, lo que incluye la competencia y el escenario socio-económico. Mediante el análisis interno/externo, que se utiliza para comparar la situación actual del proyecto y la realidad exterior para reformular la estrategia.

Para este proyecto “Remates ganaderos de pequeños productores”, se plantea la necesidad de realizar una evaluación y se optó por utilizar la metodología FODA viendo que la misma permitiría observar los resultados del proyecto en sus diferentes dimensiones: productiva, económica financiera, organizacional e institucional.

El análisis externo permitirá analizar la evolución del mercado ganadero local enfocado a los productos de los pequeños productores, poder hacer estudios comparativos con otros canales comerciales, con el objetivo de determinar amenazas y oportunidades y valorar la importancia de diferentes ideas innovadoras. Este análisis

externo se nutre de información suministrada por otras herramientas recolectadas en el día a día, o en cada uno de los eventos realizados (planillas de ventas de casa consignataria, informes institucionales).

En el análisis interno se consideran aspectos como los recursos humanos y materiales utilizados en el proyecto, la capacidad de innovación, identificación de habilidades y conocimientos, análisis de factores de éxito y fracaso de proyectos, entre otros.

El análisis FODA permite formar una imagen impresionista de la situación estratégica, también permite una interpretación ordenada de la información que genera, para definir pautas en la toma de decisiones estratégica, en el espacio competitivo actual.

Con este análisis FODA se podrán conocer los procesos de innovación realizados por los pequeños productores, como las condiciones necesarias para lograr la articulación con los mercados y la necesidad de la constitución de organizaciones adecuadas que les permitan superar las enormes limitaciones que deben enfrentar cuando operan en forma aislada. Perspectiva necesaria en ser considerada para estos estratos productivos, por disponibilidad de tierra, medios de producción, ubicación, potencialidad de desarrollo de productos diferenciados.

Estas acciones basadas en la búsqueda de solución de los problemas de este sector donde la participación, la cooperación, la solidaridad, el asociativismo, el empleo de tecnología disponible y adecuada a ésta escala productiva, los apoyos reales de los estados con financiamiento, el acompañamiento y capacitación, permitan el desarrollo de las capacidades de las personas, comunidades y sociedades, Visualizando así, actores socioeconómicos cooperantes, con regulaciones consensuadas y visiones comunes que supongan el bienestar de cada una de las partes.

2.2. PROBLEMÁTICA DE LA COMERCIALIZACIÓN GANADERA EN PEQUEÑOS PRODUCTORES

La falta de políticas claras para sectores ganaderos y en especial para los productores de los estratos más vulnerables, pone en peligro la sostenibilidad económica y social de los mismos. Y más aún, en la actualidad se profundiza esta problemática, cuando todo el sector agropecuario entra en franca subordinación con relación a la economía global y la Argentina queda enmarcada en un modelo orientado externamente, bajo los preceptos de la apertura y la competitividad.

El desarrollo de “*Remates ganaderos de pequeños productores*” realizados desde el año 2005 hasta el 2019 de manera ininterrumpida, donde el INTA articulando con

organismos público privados políticas del estado nacional enfocadas al desarrollo local encaminadas, con decisión y creatividad, movilizando todo el potencial humano que la crisis está dejando al borde del camino (Arocena,1994) para abordar la comercialización, una temática compleja en este sector. Los diagnósticos realizados previos a la realización de este proyecto mostraban limitantes agrupadas en las siguientes dimensiones: institucionales, financieras, impositivas, previsionales, organizativas, en las gestiones comerciales, en aspectos productivos, el acceso a la información y también culturales que afectan a estos productores y que impedían el acceso a estos canales comerciales.

Después de 15 remates realizados (uno por año) y teniendo en cuenta las limitaciones que aquejaban a los productores, se pueden visualizar determinados logros, enmarcados en esas mismas dimensiones, a través de indicadores cuantitativos y también cualitativos.

En el caso de los remates ganaderos de pequeños productores, plantearon acciones para superar situaciones problemáticas relacionadas a la comercialización, pero sin dejar de lado una mirada holística de otras limitantes que están en torno a ella, al sector productivo y su inserción en la cadena productiva.

Esas problemáticas consecuentes de las limitantes (antes enunciadas) fueron tenidas en cuenta para el desarrollo de la adaptación de este sistema comercial que contemple la inclusión de los pequeños productores a estructuras de comercialización ya instauradas, pero que presentaban restricciones en la accesibilidad de estos productores a las mismas.

2.3. IDEA GENERAL DE LA PROPUESTA

Para poder llevar adelante este proyecto se debió propugnar por un cambio, para el cual hubo que realizar propuestas disruptivas en un ámbito ganadero tendiente a lo conservador.

El desarrollo de este sistema comercial se basó en analizar los canales de comercialización del ganado en pie y las limitantes que impiden que los pequeños productores puedan participar de los remates ferias de venta de ganado, en el que mayoritariamente participaban los productores de mayor escala productiva.

Inicialmente parecía que la escasa participación de los pequeños ganaderos en estos remates ferias, se relacionaba solo a una cuestión de gastos de comercialización del ganado, pero luego de 14 años de realizar este tipo de remates, se puede apreciar que había otras barreras que impedían esa participación y que no todas estaban visibles en un análisis previo.

El desafío de los organizadores de este sistema comercial, la agencia de INTA Mercedes, el gobierno provincial (en esos momentos a través de PRODERNEA), los pequeños productores agrupados, era ambicioso debido a que se planteaba que se forme un grupo de pequeños productores que participe de los remates ferias, situación totalmente nueva, para muchos de ellos, conociendo las limitantes planteadas en diferentes dimensiones, y buscando al final obtener resultados satisfactorios, ya que resultados negativos hubieran generado mucha desazón y desconfianza en los productores que repercutiría en próximos eventos.

Por otro lado, el desafío no solo era sumar a los pequeños productores, sino también a otros actores de la sociedad, sobre todo aquellos que intervienen en la comercialización en la cadena ganadera, actores del sector público y del sector privado, situación que se veía necesaria para poder desarrollar las condiciones para realizar estos remates ganaderos, pero que, además, se generaran las bases para la sostenibilidad de las futuras acciones.

Tomando los indicadores más significativos, diferencias de precios de venta del ganado vs la venta individual en el campo, cantidad de productores participantes, cantidad de cabezas comercializadas, volumen de ventas totales, relacionarlo con otros canales de comercialización disponibles para estos productores, se buscará analizar dicho proceso a través de las fortalezas y oportunidades generadas por la implementación de este sistema comercial, que permitan visualizar los resultados obtenidos en las dimensiones: institucionales, financieras, impositivas, previsional, organizativa, comercial, productiva, el acceso a la información y cultural.

Fortalezas	Oportunidades
Cantidad de pequeños productores participantes: 80	Construcción de capital social.
Cabezas promedio comercializadas en los remates: 1375	Mejorar la cadena productiva hacia abajo
Promedio de cabezas por productor: 17.7	Acceso que los P.P. a los Remates ganaderos
El volumen de las ventas obtenido promedio de los remates en dólares (USD EA): US\$415.897- facturación	Formalización desde el punto de vista fiscal
La posibilidad de venta total de los animales: venta de todas las categorías desde las mas demandadas, hasta las menos demandadas	Fomentar la organización de los productores
El esfuerzo mancomunado de distintas instituciones dio sus frutos: Producto: Entramado institucional cooperante proponiendo ideas y realizando acciones	

El incremento en el valor del precio de venta de los productos: Entre un 25 %y 30 % de diferencia	
Cantidad de productores participantes: 15 % del total de los pequeños productores	
Debilidades	Amenaza
El conductismo institucional	La quita del subsidio
Dispersión geográfica	
Las conductas individualistas	

3. CONSIDERACIONES FINALES

Acción dirigida que influyó el mercado ganadero local, que estudió la cadena ganadera identificando y generando instrumentos adaptados en estos canales de comercialización.

Apoyo institucional fuerte del INTA local y el Ministerio de la Producción para llevar adelante este proyecto.

Estrategia intersectorial de desarrollo local y proceso innovador, por las relaciones y vínculos generados con y para este sector productivo.

Organización de productores fortalecida mejorando la competitividad y el poder de negociación, incremento de producciones individuales y agrupados poder lograr la escala necesaria para abordar Mercados.

Soluciones encontradas a partir de la participación, la cooperación, la solidaridad, el asociativismo, el empleo de tecnología disponible adecuada a cada escala productiva.

El incremento del capital social fruto de las articulaciones entre el sector público y privado.

Mejora en los precios del animal en los remates ganaderos P. P. Vs. la venta individual en sus establecimientos.

Impacto en la cantidad de productores participantes: 5 % de los productores del total de los pequeños productores del departamento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

Dirección de Estadística y Censos Dirección de Estadística y Censos Provincia de Corrientes. (2013). CORRIENTES EN CIFRAS año 2013. Corrientes. Departamento de Computación en Estadísticas.

Galaburri, L, Mozeris, G, (2016) compiladores de "Teoría de Sistemas" Autor: Roberto Martínez Medina. Documento Disponible en la Web.

IICA (2017) Manual de Facilitadores de Procesos de Innovación Comercial, modulo nº3: La agricultura familiar y sus actores.

IICA (2017) Manual de Facilitadores de Procesos de Innovación Comercial, modulo nº 4: El diagnóstico comercial y la investigación de mercados.

IICA (2017) Manual de Facilitadores de Procesos de Innovación Comercial, modulo nº 5: Estrategias de comercialización.

IICA (2017) Manual de Facilitadores de Procesos de Innovación Comercial, módulo nº 6: Asociativismo.

Kraemer, Jacques (2021) Sistema de comercialización de productores ganaderos a pequeña escala. Noticias y Comentarios. Ediciones INTA

Porter, M. (1996) "Estrategia Competitiva". México. Editorial CECSA.

Ponti, Diego (2011), Canales de comercialización de carne Bovina. Recuperado: https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/bovinos/informacion_interes/informes_historicos/_archivos/, PDF.

Rossi,C y León;C. RIMISP – CENTRO LATINOAMERICANO PARA EL DESARROLLO RURAL; Temas Fundamentales en la Inserción de Pequeños Productores en Cadenas Comerciales para una Estrategia de Desarrollo Rural; 2005.

Universidad de Belgrano, FEDEV Licenciatura en gestión de Agroempresas (2018). Sistemas de Agronegocios Unidad 1: Recuperado de: https://campus.ub.edu.ar/pluginfile.php/140555/mod_resource/content/1/ud1.pdf

Universidad de Belgrano, FEDEV Licenciatura en gestión de Agroempresas (2018). Administración Estratégica UNIDAD 2: Herramientas para el diagnóstico y la administración estratégica recuperado de: https://campus.ub.edu.ar/pluginfile.php/140690/mod_resource/content/2/02_administracion_estrategicaU2.pdf

Vorley, B. Vergnes, E; Bartnett, A. (2008). Agricultores de pequeña escala en el mercado globalizado tomando decisiones en un mundo cambiante. Recuperado de: http://www.rimisp.org/wp-content/files_mf/1377793224.pdf

CAPÍTULO 12

INVERSIÓN TÉCNICA PARA LA ELABORACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE NUEZ EN DELICIAS, CHIHUAHUA¹

Data de submissão: 11/08/2026

Data de aceite: 28/08/2026

Marina Imelda Terrazas Gómez

Universidad Autónoma de Chihuahua
Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales
Delicias-Chihuahua-México
<https://orcid.org/0000-0002-6559-4052>

Luisa Patricia Uranga Valencia

Universidad Autónoma de Chihuahua
Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales
Delicias-Chihuahua-México
<https://orcid.org/0000-0002-5872-6360>

Sandra Pérez Álvarez

Universidad Autónoma de Chihuahua
Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales
Delicias-Chihuahua-México
<https://orcid.org/0000-0002-9211-0797>

Víctor Hugo Villarreal Ramírez

Universidad Autónoma de Chihuahua
Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales
Delicias-Chihuahua-México
<https://orcid.org/0000-0003-3087-5062>

¹ Este manuscrito constituye una evaluación técnica detallada y una extensión del trabajo de investigación titulado "Inversión técnica para la elaboración de carbón activado a partir de cáscara de nuez en Delicias, Chihuahua", el cual fue publicado de manera preliminar en la *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan* (Vol. 12, Núm. 1, 2024). Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con la publicación de este artículo.

RESUMEN: La presente investigación tuvo como objetivo determinar la inversión técnica requerida para la implementación de una planta de producción de carbón activado a partir de cáscara de nuez en Delicias, Chihuahua, mediante una evaluación de ingeniería preliminar orientada a definir los requerimientos de proceso, infraestructura, equipamiento y tecnología. La metodología se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo y diseño no experimental de corte transversal. Se integró información obtenida mediante revisión documental especializada, entrevistas y cuestionarios aplicados a nueve empresas (cuatro plantas purificadoras de agua y cinco procesadoras de nuez) relacionadas con la generación de cáscara de nuez y el uso potencial de carbón activado. Asimismo, se empleó el método modificado de Lang y Chilton para estimar la inversión técnica requerida. Los resultados permitieron identificar las etapas fundamentales del proceso productivo, conformadas por la preparación de la materia prima, carbonización, activación y acondicionamiento final, así como los requerimientos de infraestructura y equipamiento necesarios para una planta de pequeña a mediana escala. La inversión técnica estimada ascendió a \$4,806,000 MXN, concentrándose principalmente en el equipamiento principal y la infraestructura del proceso. Se concluye que la disponibilidad regional de cáscara de nuez y sus

características fisicoquímicas ofrecen condiciones favorables para el desarrollo de proyectos de valorización agroindustrial bajo un enfoque de economía circular. La información generada constituye una base técnica para futuros estudios de ingeniería de detalle, factibilidad económica y escalamiento industrial.

PALABRAS CLAVE: residuos agroindustriales; valorización de biomasa; ingeniería de proyectos; procesos termoquímicos; economía circular.

TECHNICAL INVESTMENT FOR THE PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM WALNUT SHELL IN DELICIAS, CHIHUAHUA

ABSTRACT: This study aimed to determine the technical investment required for implementing an activated carbon production plant using walnut shell as the primary raw material in Delicias, Chihuahua, Mexico, through a preliminary engineering assessment focused on defining process, infrastructure, equipment, and technology requirements. A quantitative, descriptive, and cross-sectional research design was adopted. Data was collected through a comprehensive literature review, structured interviews, and questionnaires administered to nine companies (four water purifying plants and five walnut processors) involved in walnut processing and potential activated carbon utilization. The modified Lang and Chilton method was applied to estimate the technical investment required for plant implementation. The assessment identified the main production stages, including raw material preparation, carbonization, activation, and final conditioning, together with the infrastructure and equipment required for a small-to medium-scale production facility. The estimated technical investment amounted to MXN 4.806 million, with the highest proportion allocated to process equipment and supporting infrastructure. The findings indicate that the regional availability and physicochemical characteristics of walnut shell provide favorable conditions for the development of value-added agro-industrial projects based on circular economy principles. The proposed engineering framework offers a technical reference for subsequent detailed engineering, economic feasibility studies, and industrial-scale implementation of biomass valorization projects.

KEYWORDS: agro-industrial residues; biomass valorization; project engineering; thermochemical processes; circular economy.

1. INTRODUCCIÓN

Aprovechar los residuos agroindustriales trasciende la simple gestión ambiental; constituye el motor de la economía circular al reinsertar recursos biológicos en las cadenas de valor (Food and Agriculture Organization [FAO], 2024; Geissdoerfer et al., 2017). En este escenario, la biomasa lignocelulósica destaca por una arquitectura química que facilita su transformación térmica en materiales avanzados (Antal & Grønli, 2003). La cáscara de nuez pecanera ilustra perfectamente este potencial. Chihuahua domina la producción de este cultivo a nivel nacional, un liderazgo que conlleva la

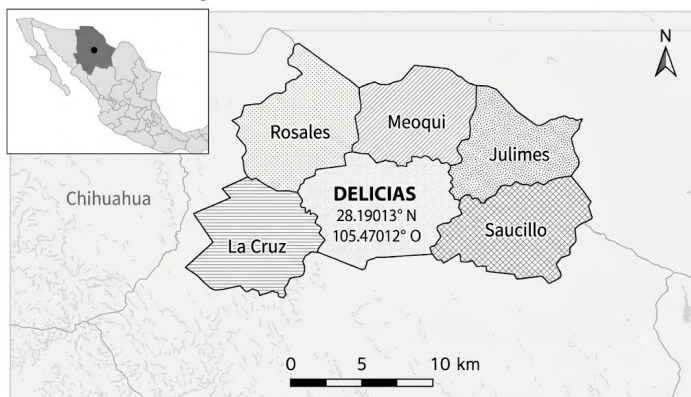
acumulación de volúmenes formidables de biomasa residual durante el descascarado (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2024; Gobierno del Estado de Chihuahua, 2025). Gracias a su densa matriz de carbono y notable resistencia térmica, este subproducto resulta un precursor óptimo para sintetizar carbón activado, un adsorbente de uso crítico en la depuración de aguas industriales (Hayashi et al., 2002; Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

La investigación contemporánea disecciona con precisión las propiedades fisicoquímicas de este material y sus rutas de activación. Sorprendentemente, el análisis rara vez cruza la frontera hacia la ingeniería de procesos. Prevalece un vacío documental agudo en torno al diseño preliminar de plantas, la especificación de equipos y la modelación del capital fijo (Peters et al., 2003; Baca Urbina, 2016; Sinnott & Towler, 2021). Semejante desconexión metodológica bloquea la transferencia tecnológica, dejando la valorización del residuo estancada a escala de laboratorio (Sapag Chain & Sapag Chain, 2014). Para subsanar esta deficiencia, la presente investigación cuantifica la inversión técnica requerida para erigir una procesadora de carbón activado en Delicias, Chihuahua. El análisis delimita rigurosamente los parámetros tecnológicos, de infraestructura y de proceso. Estructurar esta ingeniería preliminar aporta el núcleo de datos indispensable para evaluar la viabilidad financiera futura y catalizar el escalamiento industrial de la biomasa (Baca Urbina, 2016; Peters et al., 2003; Geissdoerfer et al., 2017).

2. METODOLOGÍA

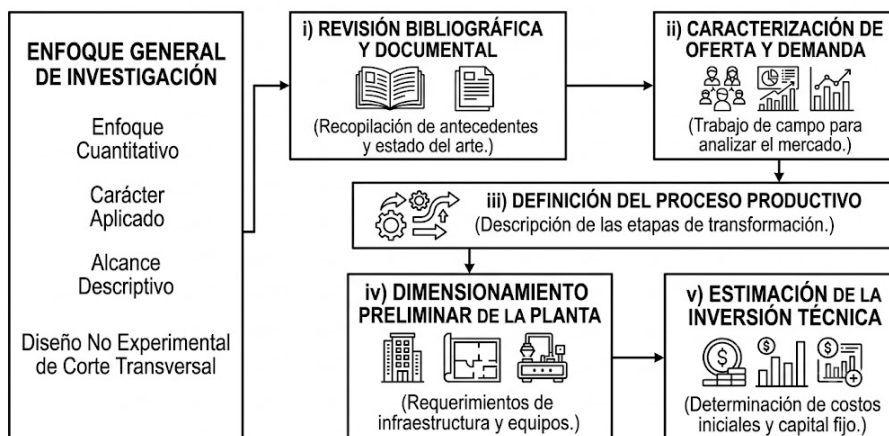
El municipio de Delicias, Chihuahua, conformó el núcleo geográfico de esta investigación. Su elección responde a un criterio puramente estratégico: la región lidera la producción nacional de nuez pecanera y agrupa una densa red de plantas procesadoras. En este territorio convergen dos variables críticas para el proyecto. Por un lado, abunda la cáscara residual; por otro, operan diversas industrias con demanda potencial de carbón activado. Semejante sinergia configura el escenario idóneo para examinar la viabilidad técnica de instalar una unidad de producción local. La delimitación espacial del área analizada se detalla en la figura próxima:

Figura 1. Ubicación del área de estudio.



El estudio adopta un marco cuantitativo y aplicado. Despliega un diseño no experimental, de corte transversal y alcance puramente descriptivo. La ejecución metodológica avanza a través de cinco fases sucesivas. Inicialmente, el análisis exige una revisión documental exhaustiva. El subsecuente trabajo de campo determina las métricas reales de oferta y demanda. Acto seguido, la investigación define la ingeniería del proceso, estructura el dimensionamiento preliminar de las instalaciones y cuantifica la inversión técnica. La figura siguiente esquematiza la articulación precisa de estas actividades.

Figura 2. Esquema metodológico de la investigación.



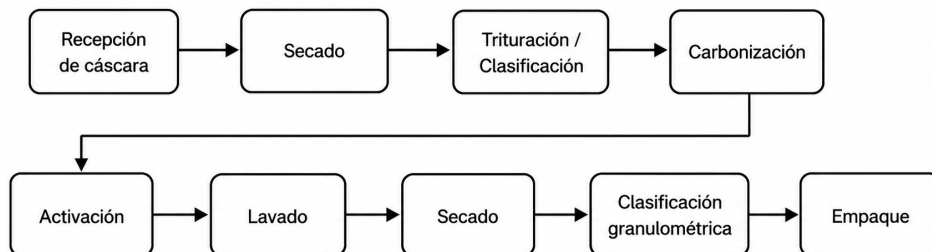
El núcleo analítico recae sobre las procesadoras de nuez y las plantas purificadoras de agua radicadas en Delicias. Estas entidades dictan la dinámica operativa del proyecto: las primeras suministran la biomasa, mientras que las segundas perfilan el consumo del carbón activado. Mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, la muestra convergió en nueve organizaciones estratégicas –cinco procesadoras y

cuatro purificadoras – avaladas por personal técnico calificado. Esta selección garantiza la representatividad indispensable para ejecutar el dimensionamiento preliminar.

La extracción de datos primarios exigió interacción directa. El levantamiento de campo articuló entrevistas gerenciales con un cuestionario estructurado de 15 reactivos predominantemente cerrados. Su diseño, sometido a pruebas previas de coherencia y rigor, obedece a los preceptos de evaluación industrial formulados por Baca Urbina (2016) y a la ingeniería de procesos. El instrumento cuantificó variables críticas. Destacan la disponibilidad volumétrica de cáscara, las capacidades instaladas, el consumo histórico de carbón, la infraestructura existente y las tendencias del mercado local.

El contraste empírico requirió una exhaustiva revisión documental. Escrutar normativas técnicas, bibliografía científica y catálogos de fabricantes de maquinaria termoquímica resultó vital. La amalgama de estos registros industriales con la información de campo dictaminó la configuración del sistema productivo. Así se estructuran con precisión las operaciones unitarias, el equipamiento principal y los servicios auxiliares, cuya secuencia de transformación ilustra el diagrama de flujo siguiente:

Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de producción de carbón activado.



La evaluación del capital fijo recurre al método modificado de Lang y Chilton, un estándar analítico fundamental en la ingeniería preliminar. El modelo ancla su cálculo en el valor actualizado de la maquinaria principal. A partir de este núcleo, despliega factores multiplicadores que cuantifican los costos directos, la obra civil, el montaje mecánico, los servicios auxiliares y la ingeniería. Alimentar esta matriz exigió recopilar cotizaciones comerciales vigentes y catálogos técnicos especializados, garantizando así la solidez empírica de la estimación financiera requerida para la planta.

El procesamiento sistemático de la información capturada recae sobre el software Minitab®. La ejecución de estadística descriptiva – mediante frecuencias, porcentajes y medidas de tendencia central – parametriza con rigor el volumen de biomasa regional disponible, proyecta la demanda del adsorbente y delimita las especificaciones del diseño.

Condensar estos resultados en formatos tabulares y gráficos clarifica de inmediato la viabilidad técnica y económica del sistema productivo propuesto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE NUEZ COMO MATERIA PRIMA

El escrutinio empírico y documental confirma que la cáscara de nuez constituye el residuo dominante de la industria nogalera en Delicias, Chihuahua. Semejante abundancia volumétrica garantiza la viabilidad del suministro para una futura procesadora de carbón activado. Estructuralmente, esta biomasa lignocelulósica ostenta una alta concentración de carbono, robustez mecánica y estabilidad térmica, parámetros intrínsecos que facilitan su conversión a través de rutas de carbonización y activación.

La evidencia científica respalda la idoneidad del precursor. La síntesis de materiales carbonosos depende de manera estricta de la composición y el comportamiento térmico inicial de la biomasa (Antal & Grønli, 2003). Consecuentemente, la naturaleza de la cáscara rige la evolución de la matriz porosa y determina la capacidad adsortiva final del producto (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

Industrializar este subproducto desplaza su aprovechamiento actual –de escaso impacto económico– hacia aplicaciones tecnológicas de alta especificidad regional. Resulta imperativo, sin embargo, reconocer los límites analíticos de esta fase. Al omitir mediciones experimentales directas sobre el contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo, la presente caracterización asume un carácter estrictamente preliminar, cimentado sobre las métricas industriales recabadas y la literatura existente.

Tabla 1. Características técnicas de la cáscara de nuez.

Característica	Descripción técnica
Tipo de residuo	Agroindustrial
Origen	Proceso de descascarado de nuez
Composición	Biomasa lignocelulósica
Contenido de carbono	Alto
Uso actual	Aprovechamiento limitado
Potencial técnico	Producción de carbón activado

3.2. DEFINIÇÃO DEL PROCESO PRODUCTIVO

El escrutinio técnico vertebral el sistema productivo mediante una secuencia inalterable: recepción, secado, reducción granulométrica, carbonización, activación, lavado, secado terminal, clasificación y empaque. Acondicionar la biomasa exige inicialmente abatir la humedad y homogeneizar el tamaño de partícula. Acto seguido, la carbonización concentra la matriz carbonosa al someter el material a condiciones de hipoxia estricta. Desplegar la estructura porosa –responsable directa de la capacidad de adsorción– requiere la etapa de activación, mientras que las maniobras ulteriores estabilizan el producto para su inserción comercial.

Esta arquitectura operativa obedece a fundamentos termoquímicos rigurosos. Variables críticas como la temperatura, el tiempo de residencia y la vía de activación rigen absolutamente la génesis de la porosidad (Hayashi et al., 2002; Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006). El mérito de esta investigación radica en sistematizar dichas variables teóricas para dimensionar, de manera preliminar, una infraestructura adaptada a la vocación productiva de Delicias. El diagrama de flujo siguiente desglosa visualmente esta progresión, separando con nitidez los núcleos térmicos de las fases de acondicionamiento físico.

Figura 4. Diagrama de flujo detallado del proceso de producción de carbón activado.

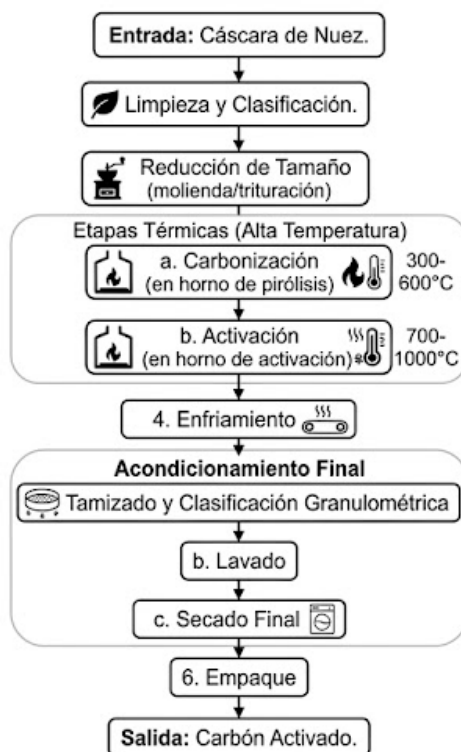


Tabla 2. Etapas del proceso productivo.

Eta pa	Función principal
Recepción	Ingreso y almacenamiento temporal de la materia prima
Secado inicial	Reducción de humedad
Trituración	Uniformidad del tamaño de partícula
Carbonización	Conversión termoquímica de la biomasa
Activación	Desarrollo de la estructura porosa
Lavado	Eliminación de impurezas y residuos
Secado final	Estabilización del producto
Clasificación	Separación granulométrica
Empaque	Acondicionamiento para almacenamiento y comercialización

3.3. REQUERIMIENTOS DE INFRAESTRUCTURA, EQUIPAMIENTO Y SERVICIOS

La arquitectura del proceso productivo exige articular equipos estructurales y periféricos para una planta de capacidad media. El despliegue tecnológico impone la instalación de reactores térmicos destinados a la carbonización y activación, complementados por módulos físicos de secado, molienda, clasificación y lavado. Espacialmente, la instalación requiere delimitar zonas precisas para la recepción de materia prima, el procesamiento continuo y el almacenaje del producto terminado.

Los sistemas térmicos constituyen el núcleo operativo de la planta. Estos dictan de manera absoluta la capacidad volumétrica y las condiciones termoquímicas impuestas a la biomasa. Paralelamente, la maquinaria auxiliar, a pesar de absorber una fracción financiera significativamente menor, resulta innegociable para garantizar el flujo ininterrumpido de la operación, el manejo del material y el rigor granulométrico del adsorbente.

Esta configuración se alinea con los preceptos de diseño preliminar estipulados por Peters et al. (2003) y Sinnott y Towler (2021). La literatura especializada condiciona la eficiencia del sistema a una integración holística entre la selección del equipamiento, la capacidad instalada y la infraestructura de servicios. Proyectar el dimensionamiento definitivo obligará, inexorablemente, a formular balances precisos de materia y energía, establecer las distribuciones de planta y validar la seguridad industrial del recinto.

Tabla 3. Requerimientos de infraestructura, equipamiento y servicios.

Categoría	Requerimiento
Equipamiento térmico	Horno de carbonización y sistema de activación
Preparación de materia prima	Secador, trituradora y sistema de alimentación
Acondicionamiento final	Lavado, secado, cribado y empaque
Manejo de materiales	Tolvas, bandas o elevadores
Infraestructura	Área de proceso, almacenes y zonas de servicio
Servicios auxiliares	Energía eléctrica, agua, ventilación y control de emisiones

3.4. ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN TÉCNICA

La inversión técnica estimada para la implementación de la planta fue de \$4,806,000 MXN. El equipamiento principal representó \$2,250,000 MXN, equivalente al 46.8 % del total; el equipo auxiliar correspondió a \$420,000 MXN, con una participación de 8.8 %; y la instalación e infraestructura ascendieron a \$2,136,000 MXN, equivalentes al 44.4 %.

Tabla 4. Distribución de la inversión técnica.

Concepto	Monto (MXN)	Participación (%)
Equipamiento principal	\$2,250,000	46.8
Equipo auxiliar	\$420,000	8.8
Instalación e infraestructura	\$2,136,000	44.4
Total	\$4,806,000	100.0

El equipamiento central y la infraestructura absorben el 91.2 % del capital estimado. Esta concentración financiera subraya la primacía técnica de los sistemas térmicos y su integración física. Adquirir maquinaria constituye apenas una fracción del desembolso industrial. Ejecutar la obra civil, ensamblar los componentes y habilitar los servicios auxiliares completan ineludiblemente la matriz de costos.

Los cálculos actuales derivan de una fase de ingeniería preliminar. El modelo modificado de Lang y Chilton aproxima la inversión estructural a partir del valor de los equipos, proyectando una referencia técnica estricta, jamás un presupuesto inamovible. Indexar cotizaciones vigentes y desarrollar la ingeniería de detalle actualizarán forzosamente esta cifra.

El escrutinio omite deliberadamente los gastos operativos, la logística de mantenimiento, la adquisición de biomasa y el capital de trabajo. Carece de indicadores

financieros. El monto dimensiona la envergadura tecnológica del proyecto, pero bloquea cualquier aseveración prematura sobre su rentabilidad económica. Semejante restricción analítica resulta plenamente congruente con los límites metodológicos de una evaluación técnica inicial.

3.5. IMPLICACIONES PARA EL APROVECHAMIENTO REGIONAL

Los hallazgos confirman que el municipio de Delicias posee la aptitud agroindustrial idónea para proyectar una planta de carbón activado. Articular la amplia disponibilidad regional de biomasa con los requerimientos técnicos ya definidos consolida el punto de partida estructural del proyecto. Bajo la rigurosa óptica de la economía circular, procesar la cáscara de nuez minimiza los volúmenes de desecho, diversifica el valor de la cadena nogalera y suministra un insumo altamente demandado en la depuración hídrica industrial. La materialización operativa de la planta, no obstante, exige agotar fases analíticas insoslayables. Previo a cualquier implementación, resulta imperativo validar experimentalmente la capacidad adsorbente del material, ejecutar balances precisos de materia y energía, cuantificar las emisiones del proceso y estructurar un análisis de factibilidad económica.

4. CONCLUSIONES

La estructuración de requerimientos operativos e infraestructura en Delicias, Chihuahua, valida la viabilidad técnica del procesamiento de cáscara de nuez. Definir las operaciones unitarias constituye el andamiaje crítico para transitar hacia la ingeniería de detalle y ejecutar los balances de materia y energía. La naturaleza lignocelulósica de esta biomasa local garantiza su efectividad en rutas termoquímicas de carbonización y activación. Industrializar este flujo residual neutraliza pasivos ambientales. Dinamiza directamente la economía circular agroindustrial.

El método modificado de Lang y Chilton parametriza la exigencia de capital en \$4,806,000 MXN. Los sistemas térmicos y su integración física acaparan el riesgo financiero mayoritario. Toda inyección definitiva de recursos dependerá de la indexación de estos cálculos frente a fluctuaciones de mercado mediante cotizaciones en tiempo real. Resta comprobar la rentabilidad. Articular un consorcio cooperativo entre nogaleros, purificadoras de agua y la administración pública blindará la cadena de suministro. Garantiza la colocación comercial del carbón activado y apalanca la captación de fondos institucionales o privados.

El rigor de este diseño trasciende el caso de estudio. Acoplar la ingeniería preliminar con los factores de Lang y Chilton cristaliza un modelo de escalabilidad nacional. Desplegar esta matriz metodológica en diversas latitudes biomásicas de México viabiliza la reconversión tecnológica y el aprovechamiento sistemático de subproductos agroindustriales.

5. APORTACIÓN CIENTÍFICA

Este estudio aporta una metodología de ingeniería preliminar capaz de cuantificar la inversión técnica para procesar carbón activado a partir de cáscara de nuez. Integrar el mapeo de disponibilidad de la materia prima, el dimensionamiento operativo y la estimación de capital fijo – mediante el método de Lang y Chilton – trasciende el ámbito local. Se consolida un esquema de evaluación estructural altamente replicable. Semejante rigor técnico facilita proyectar infraestructuras de valorización biomásica en otras coordenadas agroindustriales, dotando de viabilidad instrumental a los modelos de economía circular.

REFERENCIAS

- Antal, M. J., Jr., & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619–1640. <https://doi.org/10.1021/ie0207919>
- Baca Urbina, G. (2016). *Evaluación de proyectos* (8.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *FAOSTAT: Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2025). *Información estadística del sector agropecuario del estado de Chihuahua*. Gobierno del Estado de Chihuahua.
- Hayashi, J., Kazehaya, A., Muroyama, K., & Watkinson, A. P. (2002). Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. *Carbon*, 40(13), 2381–2386. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00178-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00178-8)
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018).
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. Elsevier.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola 2024*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

Sinnott, R. K., & Towler, G. (2021). *Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design* (6th ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-02025-0>

Terrazas-Gómez, M. I., Uranga-Valencia, L. P., Villarreal-Ramírez, V. H., Grijalva Martínez, I., & Aguirre Avilés, E. J. (2024). Inversión técnica para la elaboración de carbón activado a partir de cáscara de nuez en Delicias, Chihuahua. *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 12(1), 125–133. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v12i1.547>

CAPÍTULO 13

¿LA AGRICULTURA DESTRUYÓ A LOS MAYAS? SEQUÍAS, DEFORESTACIÓN Y COLAPSO EN LAS TIERRAS BAJAS MAYAS

Data de submissão: 29/08/2026

Data de aceite: 16/09/2026

Humberto Álvarez Sepúlveda

Universidad Católica de la
Santísima Concepción
Concepción – Chile

<https://orcid.org/0000-0001-5729-3404>

ambientales y sociopolíticas, cuyos efectos variaron entre regiones y comunidades. Más que la desaparición de la sociedad maya, este proceso implicó la transformación y desintegración de determinados sistemas urbanos y políticos.

PALABRAS CLAVE: mayas; agricultura; sequía; deforestación; colapso sociopolítico.

DID AGRICULTURE DESTROY THE MAYA? DROUGHTS, DEFORESTATION, AND COLLAPSE IN THE MAYA LOWLANDS

RESUMEN: Este capítulo examina críticamente la relación entre agricultura, transformación ambiental y el denominado «colapso maya» en las tierras bajas durante el Clásico Terminal. El análisis se organiza en tres ejes: la intensificación agrícola, la deforestación y el manejo del paisaje; las sequías y su incidencia sobre la vulnerabilidad agrícola; y la interacción entre ambiente, demografía, organización política y resiliencia. Metodológicamente, se sustenta en una revisión de alcance de literatura especializada, desarrollada desde un enfoque cualitativo-interpretativo y mediante un diseño narrativo de tópico. Se sostiene que agricultura, deforestación y sequía contribuyeron a generar condiciones de vulnerabilidad, pero no constituyen una explicación única ni determinista del proceso. En conclusión, el denominado «colapso» respondió a la convergencia de presiones

ABSTRACT: This chapter critically examines the relationship between agriculture, environmental transformation, and the so-called “Maya collapse” in the lowlands during the Terminal Classic period. The analysis is organized around three key themes: agricultural intensification, deforestation, and landscape management; droughts and their impact on agricultural vulnerability; and the interplay between environment, demography, political organization, and resilience. Methodologically, the study is based on a scoping review of specialized literature, employing a qualitative-interpretative approach and a narrative-topical design. It argues that while agriculture, deforestation, and drought contributed to conditions of vulnerability, they do not constitute a sole or deterministic explanation for the process. In conclusion, the so-called “collapse” resulted from a convergence of environmental and sociopolitical pressures, the

effects of which varied across regions and communities. Rather than the disappearance of Maya society, this process entailed the transformation and disintegration of specific urban and political systems.

KEYWORDS: maya; agriculture; drought; deforestation; sociopolitical collapse.

1. INTRODUCCIÓN

Pocas imágenes sobre las sociedades precolombinas han adquirido tanta fuerza como la de las grandes ciudades mayas abandonadas y progresivamente cubiertas por la selva. Desde las primeras investigaciones arqueológicas, el aparente contraste entre la monumentalidad de centros como Tikal, Calakmul, Copán o Caracol y su posterior disminución demográfica estimuló numerosas explicaciones sobre el denominado «colapso maya». Guerras, epidemias, conflictos internos, agotamiento de los suelos, sobrepoblación, deforestación y sequías han sido propuestas como causas de un proceso que afectó especialmente a las tierras bajas meridionales entre aproximadamente los siglos VIII y X (Demarest et al., 2005; Douglas et al., 2016; Seligson, 2023). Sin embargo, hablar de un único «colapso» puede resultar engañoso, porque las transformaciones no ocurrieron simultáneamente ni afectaron del mismo modo a todas las comunidades mayas (Demarest et al., 2005; Douglas et al., 2016). El problema radica, por tanto, no en la búsqueda de una causa universal, sino en comprender por qué determinadas sociedades resultaron especialmente vulnerables ante la interacción de múltiples presiones ambientales y sociopolíticas.

La explicación ambiental resulta particularmente atractiva. Las sociedades mayas dependían considerablemente de la agricultura y, en varias regiones, del cultivo de maíz bajo condiciones de marcada estacionalidad pluviométrica. Al mismo tiempo, el crecimiento demográfico y urbano exigía alimentos, combustible, madera y materiales destinados a construcciones monumentales. Rosenmeier et al. (2002) y Beach et al. (2006) argumentan que diversos registros sedimentarios han documentado modificaciones de la vegetación, erosión de suelos y expansión de actividades agrícolas desde mucho antes del Clásico Terminal. A partir de estas evidencias se desarrolló una interpretación aparentemente sencilla: el aumento de la población habría provocado intensificación agrícola y deforestación; estas prácticas habrían degradado progresivamente los suelos y reducido la productividad; finalmente, una sucesión de sequías habría golpeado un sistema ecológico incapaz de sostener a sus habitantes.

No obstante, esta secuencia causal presenta dificultades. La presencia de deforestación no demuestra automáticamente que esta provocara una crisis agrícola, y la existencia de sequías tampoco significa que estas determinaran mecánicamente el

abandono de las ciudades. Investigaciones sobre el manejo del paisaje (Beach et al., 2015; Lentz et al., 2018) han documentado terrazas, campos elevados, reservorios, canales, huertos domésticos, sistemas agroforestales y diferentes formas de conservación de suelos, mostrando que las poblaciones mayas no fueron agricultoras pasivas frente a un ambiente tropical hostil. Incluso algunas regiones intensamente pobladas conservaron espacios forestales durante el Clásico Tardío. La cuestión relevante no es, entonces, si los mayas transformaron el ambiente – cuestión suficientemente demostrada –, sino cuándo, dónde y en qué condiciones determinadas transformaciones pudieron convertirse en factores de vulnerabilidad.

La investigación paleoclimática ha añadido otra dimensión fundamental. Registros obtenidos de lagos, sedimentos y espeleotemas indican la ocurrencia de importantes episodios de aridez durante los siglos correspondientes al Clásico Terminal. La reconstrucción isotópica del lago Chichancanab permitió estimar reducciones significativas de las precipitaciones, mientras investigaciones posteriores como la de Evans et al. (2018) han mejorado progresivamente la resolución cronológica de los episodios secos. El problema es que la relación entre clima y transformación social tampoco fue uniforme. Algunas ciudades experimentaron crisis antes de los episodios más intensos; otras persistieron durante ellos; y determinadas poblaciones se desplazaron o reorganizaron sin desaparecer. El ambiente pudo actuar, por consiguiente, menos como una causa autónoma que como un multiplicador de vulnerabilidades preexistentes.

En este contexto, el presente ensayo busca responder a la siguiente pregunta: ¿Puede explicarse el colapso de determinadas ciudades mayas como consecuencia de una crisis agrícola y ambiental?. Para responder a esta interrogante, el análisis se organiza en tres ejes complementarios. En primer lugar, se examinan las evidencias sobre intensificación agrícola, deforestación, erosión y manejo del paisaje. En segundo término, se estudian las reconstrucciones paleoclimáticas relativas a las sequías de los siglos VIII-X y sus posibles consecuencias para sistemas agrícolas dependientes de las precipitaciones. Por último, se analiza la interacción entre ambiente, población y organización sociopolítica, prestando especial atención a las diferencias regionales y a las estrategias de resiliencia. Se argumentará que agricultura y sequía contribuyeron a generar condiciones de vulnerabilidad, pero que convertirlas en explicación única reproduce una imagen excesivamente determinista del cambio histórico maya.

2. METODOLOGÍA

Este ensayo se sustenta en una revisión de alcance de literatura especializada, siguiendo los lineamientos generales formulados por Arksey y O'Malley (2005) y por Tricco

et al. (2018). Esta estrategia resulta pertinente porque el problema estudiado atraviesa campos disciplinarios diversos, entre ellos arqueología, paleoecología, paleoclimatología, geoarqueología, historia ambiental y estudios sobre sistemas agrícolas antiguos. El propósito no consiste en realizar un metaanálisis de las estimaciones paleoclimáticas ni establecer estadísticamente una causa universal del denominado colapso, sino examinar críticamente los principales modelos utilizados para relacionar agricultura, transformación ambiental, sequía y reorganización sociopolítica. La revisión se orientó, por tanto, hacia una cuestión explicativa: hasta qué punto las evidencias disponibles permiten sostener que la intensificación agrícola y el deterioro ambiental desempeñaron un papel causal en las transformaciones experimentadas por las tierras bajas mayas.

La búsqueda bibliográfica consideró Scopus, Web of Science, SciELO y Google Scholar, complementadas con repositorios institucionales y publicaciones académicas especializadas en arqueología mesoamericana y paleoclimatología. Se privilegiaron artículos revisados por pares, obras de síntesis y estudios arqueológicos y paleoambientales relacionados directamente con las tierras bajas mayas. Se incorporaron investigaciones clásicas que resultan indispensables para reconstruir el desarrollo de la discusión, junto con literatura publicada preferentemente durante los últimos cinco años cuando esta permitía actualizar las interpretaciones sobre sequías, manejo hídrico, resiliencia y transformaciones demográficas. Entre los trabajos centrales se consideraron los estudios de Demarest et al. (2005), Douglas et al. (2016) y Seligson (2023), además de investigaciones recientes que permiten cuestionar modelos monocausales del cambio social.

Los principales descriptores considerados fueron *Classic Maya collapse*, *Maya agriculture*, *Maya Lowlands*, *deforestation*, *land degradation*, *soil erosion*, *paleoclimate*, *drought*, *water management*, *agricultural intensification*, *resilience* y *Terminal Classic*. La selección se concentró en literatura capaz de aportar información sobre cuatro dimensiones: evidencias arqueológicas de intensificación y manejo agrícola; indicadores paleoambientales de deforestación y erosión; reconstrucciones paleoclimáticas de precipitación y sequía; y relaciones entre cambio ambiental, transformaciones demográficas y desintegración de sistemas políticos. Se excluyeron interpretaciones divulgativas que presentan el «colapso maya» como consecuencia demostrada de una única causa, especialmente cuando no distinguen entre el abandono de determinados centros políticos y la continuidad histórica de las poblaciones mayas.

El corpus fue organizado mediante un enfoque cualitativo-interpretativo y un diseño narrativo de tópico estructurado en tres categorías analíticas. La primera, agricultura y transformación del paisaje, examina la intensificación productiva, la deforestación,

la erosión y las tecnologías empleadas para gestionar suelos, bosques y humedales. La segunda, sequía y vulnerabilidad agrícola, analiza los registros paleoclimáticos y las consecuencias potenciales de reducciones prolongadas o recurrentes de las precipitaciones. La tercera, crisis política, adaptación y resiliencia, considera la manera en que los factores ambientales interactuaron con densidad demográfica, competencia entre élites, guerra, organización territorial y desplazamientos poblacionales. Esta organización permite evitar una oposición artificial entre explicaciones ambientales y sociales, tratándolas como componentes potencialmente interdependientes.

Finalmente, la revisión se fundamenta en una precaución interpretativa fundamental: distinguir entre correlación cronológica, mecanismo causal y determinación histórica. La coincidencia entre una sequía y el abandono de una ciudad no demuestra, por sí sola, una relación causal; del mismo modo, la deforestación no implica necesariamente el agotamiento irreversible del sistema agrícola. Establecer relaciones causales exige considerar la cronología, intensidad y distribución espacial de los fenómenos, así como sus mecanismos de impacto y las respuestas humanas. Asimismo, se adopta una concepción crítica del término «colapso»: lo que se debilitó o desapareció en numerosas regiones fueron determinados centros urbanos, dinastías y estructuras políticas del período Clásico y no el pueblo maya como entidad histórica y cultural.

3. CULTIVAR LA SELVA: AGRICULTURA, DEFORESTACIÓN Y TRANSFORMACIÓN DEL PAISAJE

La agricultura transformó profundamente las tierras bajas mayas mucho antes de las crisis del siglo IX. Los registros de polen y sedimentos muestran disminuciones de vegetación arbórea, expansión de plantas asociadas con perturbación humana y erosión vinculada al desmonte desde períodos preclásicos. En el Petén guatemalteco, por ejemplo, los sedimentos lacustres documentan pérdida de bosque y erosión producidas por actividades humanas durante aproximadamente dos milenios antes del Clásico Terminal (Rosenmeier et al., 2002). La agricultura no puede considerarse, por tanto, una presión surgida repentinamente antes del «colapso». Fue precisamente la capacidad de modificar el paisaje, cultivar diferentes ambientes y producir excedentes la que permitió sostener numerosas poblaciones durante siglos, especialistas, élites políticas y centros monumentales.

El crecimiento demográfico intensificó, sin embargo, las exigencias sobre el territorio. El cultivo requería espacios productivos, mientras ciudades y monumentos demandaban madera, combustible y materiales. La tala podía favorecer erosión y pérdida

de nutrientes cuando los suelos quedaban expuestos a precipitaciones intensas. Beach et al. (2006) identificaron episodios extensos de erosión y sedimentación asociados con actividades humanas, aunque también demostraron una gran variabilidad espacial y temporal. Este último punto es decisivo: la alteración ambiental no siguió una trayectoria lineal desde un bosque intacto hacia una devastación final. Algunos de los episodios más importantes de erosión ocurrieron durante fases tempranas de ocupación, mientras posteriormente se desarrollaron estrategias destinadas precisamente a controlar el suelo y el agua.

Por ello, identificar agricultura intensiva con destrucción resulta problemático. McNeil (2012), Beach et al. (2015) y Lentz et al. (2018) han documentado terrazas, modificaciones de laderas, campos en humedales, huertos, arboricultura y sistemas de manejo forestal. En Tikal, la economía combinó espacios agrícolas, huertos domésticos, áreas de bosque manejado y aprovechamiento de los bajos, mientras la gestión hídrica mediante reservorios permitió almacenar agua durante la estación seca (Lentz et al., 2018). Este mosaico revela una relación mucho más sofisticada con el ambiente que la imagen de agricultores que simplemente talaron progresivamente la selva hasta destruir su base de subsistencia. La intensificación pudo producir costes ambientales, pero también generó innovaciones orientadas a aumentar la productividad y reducir riesgos.

El caso de Copán resulta especialmente ilustrativo de los problemas de la hipótesis de la deforestación. Durante décadas fue presentado como ejemplo de una población que habría sobrepasado la capacidad de carga de su territorio. No obstante, reevaluaciones paleoecológicas han cuestionado la relación directa entre pérdida forestal y crisis política. McNeil (2012) sostiene que las evidencias disponibles no respaldan la deforestación como causa suficiente del colapso de Copán y muestran prácticas agroforestales y de manejo del paisaje compatibles con una explotación prolongada. La importancia del caso radica en que obliga a separar tres afirmaciones diferentes: que los mayas modificaron los bosques; que determinadas modificaciones generaron degradación; y que esa degradación causó el abandono de una ciudad. Solo la primera puede generalizarse sin grandes reservas.

La pregunta «¿la agricultura destruyó a los mayas?» contiene así una premisa problemática. La agricultura fue simultáneamente una fuente de transformación ambiental y el fundamento que permitió sostener durante siglos una de las sociedades urbanas más complejas de América precolombina. Sus consecuencias dependieron de la densidad demográfica, las características de los suelos, la disponibilidad hídrica, las técnicas productivas y las decisiones políticas. En determinados lugares, la intensificación

probablemente redujo márgenes de seguridad frente a malas cosechas; en otros, las prácticas de conservación aumentaron la resiliencia. Más que concebir la agricultura y el ambiente como fuerzas enfrentadas, resulta necesario comprender los paisajes mayas como sistemas socioecológicos contruidos históricamente, capaces de generar tanto vulnerabilidades como soluciones.

4. CUANDO DEJÓ DE LLOVER: SEQUÍAS Y VULNERABILIDAD AGRÍCOLA

La hipótesis climática adquirió especial fuerza cuando los registros paleoclimáticos comenzaron a proporcionar evidencias independientes de episodios de aridez coincidentes con el Clásico Terminal. Estudios realizados en lagos y cuevas de la península de Yucatán mostraron variaciones hidrológicas significativas durante los siglos VIII-X. Una de las investigaciones más influyentes fue la reconstrucción realizada por Evans et al. (2018) a partir de isótopos del agua incorporada al yeso sedimentario del lago Chichancanab. Sus resultados estimaron reducciones medias de las precipitaciones cercanas al 50 % durante intervalos de sequía y disminuciones todavía mayores en momentos particularmente intensos. Tales magnitudes permiten descartar la idea de que la aridez fuera simplemente una fluctuación climática irrelevante.

Para sociedades dependientes en buena medida de cultivos de secano, una disminución sostenida de las precipitaciones podía generar consecuencias importantes. El maíz es sensible no solamente al volumen anual de lluvia, sino también a su distribución durante el ciclo agrícola. Una reducción de las precipitaciones durante momentos críticos podía provocar pérdidas de cosechas, aunque la media anual no descendiera de manera catastrófica. A ello se añadía la marcada estacionalidad de las tierras bajas y, en determinadas zonas, la ausencia de grandes cursos superficiales permanentes. Reservorios, aguadas, cenotes y otras infraestructuras mitigaban esa vulnerabilidad, pero requerían suficiente precipitación durante la estación húmeda para almacenar agua. La sequía podía afectar así simultáneamente al consumo humano y a la producción agrícola (Bhattacharya et al., 2023).

No obstante, hablar de «la sequía» simplifica un fenómeno caracterizado por episodios diferentes en intensidad, duración y distribución geográfica. Douglas et al. (2016) mostraron que los siglos IX-XI registraron sequías particularmente severas y frecuentes, pero también advirtieron que las transformaciones económicas y políticas habían comenzado en algunas regiones meridionales antes de los episodios climáticos más extremos. Diversas investigaciones (Douglas et al., 2016; Evans et al., 2018; Seligson, 2023) han permitido precisar esa cronología y confirmar la existencia de intervalos secos

prolongados durante el Clásico Terminal. Esta evidencia refuerza la importancia del clima, pero también dificulta convertirlo en un reloj causal capaz de explicar simultáneamente el abandono de todas las ciudades.

La vulnerabilidad dependía además de las condiciones locales. Una ciudad con reservorios extensos, acceso a humedales, suelos productivos o redes comerciales podía responder de manera distinta que otra dependiente de un territorio agrícola más restringido. El estudio reciente de McLellan et al. (2026), basado en el análisis de 294 asentamientos de Belice, confirma esta heterogeneidad al mostrar importantes diferencias espaciales y temporales en los procesos de abandono, así como una mayor persistencia de los asentamientos próximos a fuentes permanentes de agua. Las estrategias de manejo del agua fueron precisamente uno de los mecanismos mediante los cuales las comunidades afrontaron la variabilidad climática (Bhattacharya et al., 2023). La adaptación, sin embargo, posee límites. Una tecnología desarrollada para superar una estación seca normal puede resultar insuficiente frente a varios años consecutivos de déficit pluviométrico. El problema no sería entonces la incapacidad maya para comprender su ambiente, sino la posibilidad de que acontecimientos excepcionalmente intensos sobrepasaran sistemas diseñados para enfrentar una variabilidad climática de menor magnitud.

Las sequías deben interpretarse, por consiguiente, como factores de estrés y no como órdenes automáticas de colapso. Una comparación útil procede de Mayapán, aunque corresponda a un período posterior. Kennett et al. (2022) encontraron una relación entre sequía prolongada, dificultades productivas, rivalidades políticas y aumento de la violencia durante los siglos XIV-XV. Sin embargo, el abandono de la capital no significó el fin de la sociedad maya y las estructuras económicas y políticas persistieron regionalmente. El ejemplo demuestra un mecanismo plausible: el clima puede deteriorar condiciones materiales, intensificar conflictos preexistentes y contribuir a desestabilizar instituciones sin determinar por sí solo el resultado histórico. Esta lógica ofrece un marco más productivo para interpretar también las crisis del Clásico Terminal.

5. MÁS ALLÁ DEL «COLAPSO»: POLÍTICA, DEMOGRAFÍA Y RESILIENCIA MAYA

El concepto de «colapso maya» puede inducir a imaginar una civilización que alcanzó su apogeo y desapareció repentinamente. La evidencia arqueológica muestra un fenómeno distinto. Entre aproximadamente los años 750 y 1000 disminuyeron significativamente la construcción monumental, las inscripciones dinásticas y la población en numerosos centros de las tierras bajas meridionales, pero el proceso presentó cronologías distintas. Mientras algunas ciudades perdieron población, otras

regiones mantuvieron o incrementaron su importancia. El norte de Yucatán experimentó un desarrollo político significativo durante y después de las crisis meridionales. Por ello, resulta más preciso hablar del colapso de determinados sistemas políticos del período Clásico que de la desaparición de la civilización maya (Demarest et al., 2005; Douglas et al., 2016).

Las condiciones políticas pudieron aumentar considerablemente la vulnerabilidad ambiental. El Clásico Tardío estuvo caracterizado por múltiples entidades políticas cuyos gobernantes competían mediante alianzas, guerra, prestigio dinástico y construcción monumental. Mantener esas estructuras requería movilizar trabajo y recursos. Una reducción prolongada de la producción agrícola podía afectar no solo la disponibilidad de alimentos, sino también la legitimidad de los gobernantes. Sin embargo, las transformaciones políticas del Clásico Terminal no condujeron exclusivamente a la desintegración institucional: evidencias recientes procedentes de Ucanal muestran la aparición de espacios vinculados con formas más colectivas de gobierno y participación política (Halperin et al., 2026). En este sentido, las crisis pudieron generar también procesos de reorganización de las estructuras políticas. La respuesta dependía de cómo cada sociedad distribuía recursos y organizaba las cargas asociadas con la escasez.

La presión demográfica constituyó otra variable relevante. Una población elevada no conduce necesariamente al colapso, pues puede estimular la innovación y la intensificación agrícola; sin embargo, también puede reducir la capacidad de respuesta cuando la producción se aproxima a sus límites bajo condiciones climáticas adversas. El problema no habría sido simplemente la existencia de «demasiados mayas», sino la dependencia de ciertas concentraciones poblacionales respecto de sistemas agrícolas, hídricos y políticos complejos, cuya estabilidad podía verse comprometida tras varios años de malas cosechas. Mientras una comunidad pequeña podía abandonar temporalmente tierras marginales, una gran ciudad requería mantener redes de abastecimiento, almacenamiento e infraestructura hídrica. Así, la misma complejidad que permitió sostener poblaciones numerosas pudo convertirse, en determinadas circunstancias, en una fuente de vulnerabilidad.

Las diferencias regionales constituyen una de las objeciones más importantes contra cualquier explicación monocausal. Si la deforestación o la sequía hubieran provocado mecánicamente el colapso, cabría esperar respuestas relativamente similares en lugares sometidos a presiones equivalentes. No obstante, la arqueología revela procesos de persistencia, movilidad, reorganización y recuperación. Estudios recientes sobre el norte de Yucatán (Seligson, 2023; Masson et al., 2024) muestran que las poblaciones rurales

desempeñaron un papel importante en la continuidad y posterior regeneración de los sistemas sociopolíticos. La ocupación rural persistió durante períodos de desintegración y recuperación política, preservando conocimientos culturales, proporcionando espacios de acogida para poblaciones desplazadas y contribuyendo a la regeneración de las estructuras estatales. La trayectoria histórica maya fue, por consiguiente, también una historia de resiliencia.

Esta continuidad obliga a desmontar la imagen de una «desaparición». Los mayas no desaparecieron en el siglo IX ni después del abandono de determinadas capitales. Las sociedades del Posclásico desarrollaron nuevas configuraciones políticas y económicas; ciudades como Chichén Itzá y posteriormente Mayapán ocuparon posiciones relevantes; y más de siete millones de personas mayas continúan viviendo actualmente en México, Guatemala, Belice, Honduras y El Salvador (National Museum of the American Indian, s. f.). Incluso después de episodios posteriores de crisis política y ambiental, las comunidades demostraron una notable capacidad de reorganización. La pregunta histórica más fértil no es, por ello, por qué desaparecieron los mayas, sino por qué determinados sistemas urbanos y dinásticos perdieron estabilidad mientras comunidades, prácticas culturales y redes económicas consiguieron adaptarse y persistir.

6. CONCLUSIÓN

La explicación que atribuye el denominado colapso maya a la destrucción ambiental producida por la agricultura posee una fuerza intuitiva considerable. Una población creciente habría talado bosques, agotado suelos y aumentado su dependencia de cosechas cada vez más vulnerables hasta que una sucesión de sequías hizo insostenible el sistema. Parte de esta secuencia encuentra respaldo empírico: las sociedades mayas transformaron intensamente sus paisajes, existieron episodios de deforestación y erosión y los registros paleoclimáticos documentan importantes sequías durante el Clásico Terminal. Sin embargo, convertir estas evidencias en una cadena causal universal excede lo que permite sostener la investigación disponible. Transformación ambiental no equivale necesariamente a degradación irreversible, del mismo modo que sequía no equivale automáticamente a colapso político.

La agricultura desempeñó un papel ambivalente. Generó impactos ambientales, pero también hizo posible el desarrollo demográfico y político de las sociedades mayas durante siglos. Frente a los problemas asociados con suelos, agua y estacionalidad, las comunidades construyeron terrazas, modificaron humedales, desarrollaron sistemas agroforestales, mantuvieron huertos y almacenaron agua. Estas estrategias muestran

conocimiento ambiental acumulado y capacidad adaptativa. En determinados contextos, la intensificación pudo reducir márgenes de seguridad y aumentar la exposición a malas cosechas, pero no existe fundamento suficiente para describir a los mayas en conjunto como una sociedad que destruyó irreflexivamente la base ecológica de su propia existencia.

Las sequías de los siglos VIII-X proporcionan una pieza fundamental del problema porque pudieron reducir la productividad y tensionar sistemas hídricos y alimentarios. Su importancia, no obstante, dependió de las condiciones sociales sobre las cuales actuaron. Una misma anomalía climática puede producir consecuencias diferentes según infraestructura, densidad poblacional, disponibilidad de agua, diversidad productiva, acceso al intercambio y capacidad institucional. Esta interacción permite comprender por qué las transformaciones fueron espacial y cronológicamente desiguales. El clima no necesita ser concebido como una causa suficiente para haber desempeñado un papel histórico decisivo: pudo amplificar vulnerabilidades existentes hasta superar las capacidades de respuesta de determinadas ciudades.

La pregunta orientadora puede responderse, por tanto, de manera matizada. Sí, una crisis agrícola y ambiental contribuyó probablemente al colapso de determinadas ciudades mayas, pero no constituye una explicación suficiente ni universal. Las sequías actuaron sobre paisajes ya profundamente transformados y sociedades caracterizadas por altas densidades demográficas, competencia política, desigualdad y conflictos. En algunos lugares, esa combinación pudo generar retroalimentaciones entre escasez, pérdida de legitimidad, migraciones y desintegración política; en otros, las comunidades conservaron capacidades de adaptación. El «colapso» emerge, así, como un proceso multicausal producido por la interacción entre sistemas naturales y sociales y no como el desenlace inevitable de una única práctica agrícola.

Finalmente, el caso maya ofrece una valiosa advertencia metodológica para comprender las relaciones históricas entre sociedad y ambiente. Atribuir una transformación social al clima o a la degradación ecológica resulta insuficiente si no se explican los mecanismos mediante los cuales esas presiones alteraron la producción, el abastecimiento, la organización política o la capacidad de respuesta de las comunidades. Reconocer la agencia humana tampoco supone restar importancia al entorno, pues las sociedades transforman los ecosistemas al mismo tiempo que desarrollan conocimientos, tecnologías y estrategias para adaptarse a sus cambios. La trayectoria maya revela precisamente esa interacción entre vulnerabilidad y resiliencia: los paisajes se modificaron, las precipitaciones disminuyeron y numerosos centros urbanos perdieron población, pero la sociedad maya no desapareció. Más que un final, el denominado «colapso» representó

la transformación de determinadas estructuras políticas, urbanas y territoriales dentro de una historia maya mucho más extensa.

REFERENCIAS

- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19-32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Beach, T., Dunning, N., Luzzadder, S., Cook, D. & Lohse, J. (2006). Impacts of the ancient Maya on soils and soil erosion in the central Maya Lowlands. *Catena*, 65(2), 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.11.007>
- Beach, T., Luzzadder, S., Cook, D., Dunning, N., Kennett, D., Krause, S., Terry, R., Trein, D., & Valdez, F. (2015). Ancient Maya impacts on the Earth's surface: An Early Anthropocene analog? *Quaternary Science Reviews*, 124, 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.05.028>
- Bhattacharya, T., Krause, S., Penny, D., & Wahl, D. (2023). Drought and water management in ancient Maya society. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 47(2), 189-204. <https://doi.org/10.1177/03091333221129784>
- Demarest, A., Rice, P., & Rice, D. (Eds.). (2005). *The Terminal Classic in the Maya Lowlands: Collapse, transition, and transformation*. University Press of Colorado.
- Douglas, P., Demarest, A., Brenner, M., & Canuto, M. (2016). Impacts of climate change on the collapse of Lowland Maya civilization. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, 613-645. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012512>
- Evans, N., Bauska, T., Gázquez, F., Brenner, M., Curtis, J., & Hodell, D. (2018). Quantification of drought during the collapse of the Classic Maya civilization. *Science*, 361(6401), 498-501. <https://doi.org/10.1126/science.aas9871>
- Halperin, C., Ramos, C., & Gauthier, L. (2026). Council houses and new systems of governance in the Terminal Classic Southern Maya Lowlands. *Antiquity*, 100(411), 763-783. <https://doi.org/10.15184/aqy.2026.10329>
- Kennett, D., Masson, M., Lope, C., Serafin, S., George, R., Spencer, T., Hoggarth, J., Culleton, B., Harper, T., Prufer, K., Milbrath, S., Russell, B., González, E., McCool, W., Aquino, V., Paris, E., Curtis, J., Marwan, N., Zhang, M., ... Hodell, D. (2022). Drought-induced civil conflict among the ancient Maya. *Nature Communications*, 13, 3911. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31522-x>
- Lentz, D., Dunning, N., Scarborough, V., & Grazioso, L. (2018). Imperial resource management at the ancient Maya city of Tikal: A resilience model of sustainability and collapse. *Journal of Anthropological Archaeology*, 52, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2018.08.005>
- McLellan, A., Metcalfe, S., Rushton, E., Akers, P., de la Barreda, B., Márdero, S., Ambrogio, O., Schrodt, F., & Endfield, G. (2026). Ancient Maya settlement abandonment and climate instability in Belize (700-1600 CE): A spatial analysis of adaptive resilience. *Journal of Archaeological Science*, 193, 106661. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2026.106661>
- Masson, M., Hare, T., Peraza, C., Kennett, D., Witschey, W., Russell, B., Serafin, S., James, R., Flores, L., Delgado, P., Escamilla, B., & Cruz, W. (2024). Postclassic Maya population recovery and rural resilience in the aftermath of collapse in northern Yucatan. *Journal of Anthropological Archaeology*, 76, 101610. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2024.101610>

McNeil, C. (2012). Deforestation, agroforestry, and sustainable land management practices among the Classic period Maya. *Quaternary International*, 249, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.055>

National Museum of the American Indian. (s. f.). *The Maya*. Smithsonian Institution.

Rosenmeier, M., Hodell, D., Brenner, M., Curtis, J., & Guilderson, T. (2002). A 4000-year lacustrine record of environmental change in the southern Maya Lowlands, Petén, Guatemala. *Quaternary Research*, 57(2), 183-190. <https://doi.org/10.1006/qres.2001.2305>

Seligson, K. (2023). *The Maya and climate change: Human-environmental relationships in the Classic Period Lowlands*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780197652923.001.0001>

Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., ... Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467-473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>

CAPÍTULO 14

¿CULTIVARON LOS INCAS EN EL DESIERTO? AGRICULTURA, AGUA Y TRANSFORMACIÓN DEL PAISAJE EN EL IMPERIO INCA

Data de submissão: 01/09/2026

Data de aceite: 16/09/2026

Humberto Álvarez Sepúlveda

Universidad Católica de la

Santísima Concepción

Concepción – Chile

<https://orcid.org/0000-0001-5729-3404>

RESUMEN: Este capítulo examina críticamente la relación entre agricultura, manejo del agua y transformación del paisaje en el Imperio inca, con especial atención a los ambientes áridos y al sitio de Moray. El análisis se organiza en tres ejes: la construcción de terrazas y la transformación de las limitaciones topográficas en espacios productivos; la gestión del agua y el desarrollo de sistemas agrícolas en ambientes áridos; y la interpretación de Moray como posible «laboratorio agrícola» inca. Metodológicamente, se sustenta en una revisión de alcance de literatura especializada, desarrollada desde un enfoque cualitativo, histórico e interpretativo y mediante un diseño narrativo de tópico. Se sostiene que la agricultura inca no constituyó una simple adaptación a las condiciones naturales, sino que se apoyó en conocimientos, tecnologías e infraestructuras capaces de transformar

determinados paisajes, aunque muchas de estas prácticas poseían antecedentes preincaicos. En conclusión, Moray evidencia la sofisticación de la agricultura andina, pero su interpretación como «laboratorio agrícola» debe considerarse una hipótesis plausible antes que una función arqueológicamente demostrada.

PALABRAS CLAVE: agricultura inca; terrazas agrícolas; irrigación; Moray; paisaje andino.

DID THE INCAS FARM IN THE DESERT? AGRICULTURE, WATER, AND LANDSCAPE TRANSFORMATION IN THE INCA EMPIRE

ABSTRACT: This chapter critically examines the relationship between agriculture, water management, and landscape transformation in the Inca Empire, with particular attention to arid environments and the site of Moray. The analysis is organized around three main themes: the construction of terraces and the transformation of topographic constraints into productive spaces; water management and the development of agricultural systems in arid environments; and the interpretation of Moray as a possible Inca “agricultural laboratory.” Methodologically, the study is based on a scoping review of specialized literature, conducted from a qualitative, historical, and interpretive perspective and using a topical narrative design. It argues that Inca agriculture did not constitute a simple adaptation to natural conditions but rather

relied on knowledge, technologies, and infrastructure capable of transforming particular landscapes, although many of these practices had pre-Inca precedents. In conclusion, Moray demonstrates the sophistication of Andean agriculture, but its interpretation as an “agricultural laboratory” should be regarded as a plausible hypothesis rather than an archaeologically demonstrated function.

KEYWORDS: inca agriculture; agricultural terraces; irrigation; Moray; andean landscape.

1. INTRODUCCIÓN

La imagen del Imperio inca suele asociarse a montañas, valles interandinos y extensas terrazas que ascienden por las laderas de los Andes. Sin embargo, el Tawantinsuyu abarcó un territorio mucho más heterogéneo, desde regiones tropicales hasta algunos de los espacios más áridos del planeta. En consecuencia, hablar de “agricultura inca” como si se tratara de un único sistema tecnológico resulta problemático. Las poblaciones integradas al imperio cultivaron en ambientes situados a distintas altitudes, con regímenes de precipitación, temperaturas, suelos y disponibilidades hídricas considerablemente diferentes. Esta diversidad obligó a desarrollar estrategias que combinaban selección de cultivos, irrigación, construcción de terrazas, modificación de suelos y aprovechamiento complementario de distintos pisos ecológicos. Como mostró tempranamente Murra (1972), la organización económica andina estuvo estrechamente relacionada con el acceso simultáneo o complementario a ambientes ecológicamente diferenciados.

En los Andes, por tanto, la agricultura no puede explicarse exclusivamente a partir de las condiciones naturales existentes. En determinados lugares, cultivar significó intervenir activamente el territorio para crear condiciones que previamente no existían. Las terrazas transformaron pendientes en superficies cultivables; los muros contribuyeron al control de la erosión; los canales trasladaron agua a espacios naturalmente secos; y las prácticas de manejo del suelo modificaron sus propiedades a largo plazo. Denevan (2001) ha destacado precisamente que una característica fundamental de la agricultura indígena sudamericana fue su capacidad para producir paisajes agrícolas mediante modificaciones deliberadas del ambiente. Leceta et al. (2024) refuerzan esta perspectiva al demostrar que los suelos de antiguas terrazas conservan evidencias materiales de procesos prolongados de construcción, cultivo y manejo humano.

El problema adquiere especial interés en ambientes áridos. En el margen oriental del desierto de Atacama, por ejemplo, existen sistemas agrícolas prehispánicos que funcionaron durante el Periodo Intermedio Tardío y continuaron siendo utilizados durante el periodo inca. En estos paisajes, Sandor et al. (2022) han identificado terrazas irrigadas, parcelación de superficies y modificaciones intencionales de los suelos, donde la

agricultura habría resultado prácticamente imposible sin una administración sistemática del agua. Esta premisa obliga a reformular una pregunta aparentemente sencilla: ¿En qué medida los incas cultivaron en ambientes desérticos y áridos gracias a su capacidad de adaptarse a la naturaleza, y hasta qué punto lo hicieron transformando deliberadamente el paisaje para producir nuevas condiciones agrícolas? La distinción es importante, pues permite abandonar la idea de una adaptación pasiva y comprender la agricultura como una relación histórica entre sociedades, tecnología y ambiente.

Dentro de este problema, Moray ocupa una posición singular. Situado cerca de Maras, en la actual región del Cusco, presenta grandes depresiones ocupadas por terrazas concéntricas cuya extraordinaria geometría ha dado origen a una interpretación muy difundida: Moray habría constituido un “laboratorio agrícola” donde los incas reprodujeron diferentes microclimas para experimentar con cultivos y determinar en qué condiciones podían desarrollarse. La hipótesis resulta atractiva y existen características materiales que la hacen plausible, entre ellas la presencia de andenes, obras hidráulicas y diferencias microambientales. Incluso organismos oficiales peruanos presentan actualmente el lugar como un centro de experimentación agrícola. No obstante, la repetición de una interpretación no equivale por sí misma a su demostración arqueológica.

Este ensayo propone, por ello, analizar conjuntamente dos escalas. En una primera escala, se examina la agricultura andina como proceso de transformación del paisaje mediante terrazas, irrigación y manejo de la diversidad ecológica. En una segunda, se utiliza Moray como estudio de caso para discutir los límites de aquello que puede inferirse a partir de las evidencias disponibles. La argumentación no pretende minimizar los conocimientos agrícolas incas, ampliamente documentados, sino evitar que su reconocimiento dependa de afirmaciones más categóricas que las evidencias que las sustentan. Precisamente porque la ingeniería agrícola andina fue extraordinariamente compleja, resulta necesario comprenderla históricamente, reconociendo tanto las innovaciones imperiales como la prolongada acumulación de conocimientos desarrollados por sociedades anteriores a la expansión inca.

2. METODOLOGÍA

El ensayo se sustenta metodológicamente en una revisión de alcance de literatura especializada (Arksey y O'Malley, 2005; Tricco et al., 2018), desarrollada desde un enfoque cualitativo, histórico e interpretativo. Esta estrategia resulta pertinente porque el propósito no consiste en determinar cuantitativamente la eficacia de una tecnología agrícola específica, sino en identificar y contrastar las principales

explicaciones desarrolladas sobre agricultura, irrigación, terrazas y transformación del paisaje durante el periodo inca. Se consideraron investigaciones arqueológicas, geoarqueológicas, paleoambientales y etnohistóricas, junto con trabajos clásicos indispensables para comprender la discusión sobre ecología y agricultura andinas. La revisión permitió, además, diferenciar entre afirmaciones sustentadas directamente en evidencias materiales y aquellas que poseen un carácter principalmente inferencial.

La búsqueda bibliográfica consideró publicaciones especializadas localizables en Web of Science, Scopus, SciELO, JSTOR, Google Scholar y repositorios académicos institucionales, mediante combinaciones de términos como *Inca agriculture*, *Andean terraces*, *irrigation*, *water management*, *agricultural landscapes*, *Moray*, *Inca agricultural laboratory*, *Atacama agriculture* y *Andean ecological zones*. Se priorizaron artículos revisados por pares, libros académicos y estudios arqueológicos relacionados directamente con los sistemas agrícolas prehispánicos. Temporalmente, se incorporaron obras clásicas necesarias para reconstruir el desarrollo de la discusión – particularmente Murra (1972) y Denevan (2001) – y se otorgó especial atención a investigaciones publicadas durante los últimos cinco años.

Los criterios de inclusión contemplaron trabajos que aportaran evidencias o interpretaciones sobre cuatro dimensiones: construcción y funcionamiento de terrazas; sistemas prehispánicos de irrigación y almacenamiento de agua; modificación antropogénica de suelos y paisajes; e interpretación arqueológica de Moray. Fueron excluidas publicaciones turísticas o divulgativas cuando sus afirmaciones no podían rastrearse hasta investigaciones académicas, aunque algunas fueron consideradas secundariamente para analizar cómo determinadas hipótesis arqueológicas han pasado al discurso patrimonial contemporáneo. Esta precaución resulta particularmente importante en Moray, donde expresiones como “laboratorio agrícola” o “centro experimental” circulan actualmente en numerosos materiales institucionales y turísticos.

El análisis se organizó mediante una lectura temática y comparativa de las publicaciones seleccionadas. En primer lugar, se identificaron evidencias sobre modificación física del territorio: muros, terrazas, canales, depósitos, suelos antropogénicos y distribución espacial de campos agrícolas. En segundo lugar, se examinaron las interpretaciones funcionales propuestas para dichas estructuras. Por último, se comparó el grado de certeza asociado a cada afirmación. De esta manera, se distinguió entre evidencia material, interpretación funcional razonablemente sustentada e hipótesis plausible pero no concluyente. Esta diferenciación resulta esencial porque la existencia de terrazas y canales puede demostrarse arqueológicamente, mientras que atribuirles funciones experimentales específicas exige evidencias adicionales.

La revisión fue organizada finalmente en tres núcleos argumentativos. El primero aborda la construcción de terrazas y la transformación de las limitaciones topográficas en oportunidades productivas. El segundo examina el agua como componente tecnológico y político de la agricultura en ambientes áridos. El tercero analiza Moray y la interpretación del sitio como laboratorio agrícola. Esta estructura sigue el principio de avanzar desde las evidencias generales y comparativas hacia un problema arqueológico particular. El objetivo no es resolver definitivamente la función de Moray, sino utilizarla para demostrar que comprender la agricultura inca exige combinar el reconocimiento de sus logros tecnológicos con una evaluación crítica del grado de certeza de las interpretaciones actuales.

3. CONSTRUIR TIERRA CULTIVABLE: TERRAZAS Y TRANSFORMACIÓN DEL PAISAJE

Una de las características más impresionantes de la agricultura andina es que la tierra cultivable no siempre constituía un recurso simplemente disponible: frecuentemente debía ser construida. Las pendientes pronunciadas, la erosión, las variaciones térmicas y la escasez de superficies planas planteaban obstáculos significativos para la producción. Las terrazas permitieron intervenir estas condiciones mediante muros de contención y superficies relativamente horizontales. Más que una técnica aislada, constituyeron una forma de reorganizar las relaciones entre suelo, pendiente y agua. Como plantea Denevan (2001), las sociedades indígenas americanas desarrollaron numerosos sistemas de campos modificados que convirtieron ambientes aparentemente marginales en paisajes productivos duraderos.

Esta infraestructura no fue inventada íntegramente por los incas. Las terrazas agrícolas poseen una historia preincaica extensa en diferentes regiones andinas, por lo que resulta incorrecto atribuir al Tawantinsuyu la creación de toda la tecnología agrícola visible en territorios posteriormente incorporados al imperio. Los incas heredaron, reutilizaron, reorganizaron y ampliaron sistemas anteriores. Este aspecto modifica sustancialmente la interpretación histórica: la agricultura imperial fue resultado tanto de innovaciones promovidas durante la expansión estatal como de conocimientos acumulados durante siglos por comunidades locales. La capacidad inca consistió, en buena medida, en integrar diferentes tradiciones agrícolas dentro de redes políticas y económicas de mayor escala.

Los andenes podían proporcionar distintas ventajas según su emplazamiento, entre ellas ampliar las superficies cultivables, reducir la pérdida de suelo por erosión, regular la humedad y facilitar el cultivo en pendientes. Sin embargo, sería incorrecto

suponer que todas las terrazas desempeñaban las mismas funciones, pues su diseño, orientación, materiales y sistemas de abastecimiento hídrico variaban de acuerdo con las condiciones locales. En este sentido, Leceta et al. (2024), a partir de investigaciones pedo-geoarqueológicas realizadas en Laramate, en los Andes meridionales del Perú, evidencian la complejidad de estas intervenciones y destacan la necesidad de analizar conjuntamente la geomorfología, los paleosuelos y las prácticas agrícolas para comprender el funcionamiento y la evolución de estos sistemas de cultivo. Esta perspectiva ha sido ampliada por Mader et al. (2024), quienes, mediante la integración de evidencias arqueológicas, geomorfológicas, edafológicas y espaciales procedentes de sistemas de terrazas de los Andes meridionales peruanos, muestran que estas infraestructuras formaban parte de paisajes agrícolas complejos, configurados en relación con los asentamientos, la disponibilidad de agua, las condiciones ambientales y la organización de la producción.

La modificación podía alcanzar incluso las propiedades del suelo. Un ejemplo especialmente significativo procede del margen oriental del desierto de Atacama. Sandor et al. (2022) estudiaron antiguos sistemas de terrazas irrigadas correspondientes principalmente al Periodo Intermedio Tardío y al periodo inca. Los perfiles analizados muestran modificaciones asociadas a la construcción de terrazas, extracción de fragmentos rocosos y probable fertilización. En un ambiente hiperárido, estas transformaciones adquirirían una importancia decisiva: no bastaba con disponer de semillas y herramientas, porque la agricultura dependía de la producción de condiciones edáficas e hídricas adecuadas.

Por ello, resulta más preciso hablar de paisajes agrícolas contruidos que simplemente de tierras agrícolas. Esta distinción permite comprender que la producción de alimentos no dependía únicamente de las condiciones naturales disponibles, sino también de transformaciones acumuladas a lo largo del tiempo. Un andén, incluso después de ser abandonado, constituye una huella material de ese proceso, pues conserva evidencias del trabajo, los conocimientos técnicos y las decisiones de las generaciones que intervinieron el territorio.

Desde esta perspectiva, la agricultura andina cuestiona una separación rígida entre sociedad y naturaleza. Los agricultores no podían eliminar las limitaciones ambientales impuestas por la aridez, las pendientes o las características de los suelos, pero tampoco se limitaban a adaptarse pasivamente a ellas. En este sentido, Frogley et al. (2025) sostienen que los incas y sus predecesores desarrollaron estrategias que combinaron terrazas, sistemas de irrigación y otras prácticas orientadas a reducir la erosión,

conservar la fertilidad de los suelos y sostener una producción agrícola diversificada en ambientes de altura. Estas evidencias permiten comprender la agricultura inca no como un conjunto de tecnologías aisladas, sino como parte de formas más amplias de transformación y manejo integrado del paisaje.

4. HACER FLUIR EL AGUA: AGRICULTURA INCA EN AMBIENTES ÁRIDOS

Si las terrazas permitieron construir superficies cultivables, el agua determinó en muchos casos la posibilidad misma de utilizarlas. Esta cuestión resulta especialmente evidente en ambientes áridos, donde las precipitaciones resultaban insuficientes o excesivamente irregulares. La respuesta consistió en desarrollar infraestructuras capaces de captar, almacenar, conducir y distribuir agua. Canales, acequias, manantiales acondicionados y reservorios constituyeron componentes de sistemas hidráulicos cuya función trascendía la simple irrigación. Controlar el agua significaba administrar temporalmente un recurso limitado y coordinar trabajo, mantenimiento y distribución.

Los estudios arqueológicos recientes han demostrado que estos sistemas hidráulicos podían alcanzar un alto grado de complejidad. Grana et al. (2023), por ejemplo, recurrieron al análisis de diatomeas para estudiar estructuras prehispánicas vinculadas con el manejo y almacenamiento de agua en los Andes centro-sur. Sus resultados también evidencian la necesidad de contar con pruebas específicas antes de atribuir una determinada función a una estructura hidráulica, ya que una construcción cuya forma parece corresponder a un reservorio no necesariamente fue utilizada para almacenar agua de manera permanente. Esta precaución metodológica resulta especialmente relevante para el estudio del mundo inca, pues advierte que la forma arquitectónica de una estructura no permite, por sí sola, determinar la función que desempeñó en el pasado.

El desierto de Atacama proporciona nuevamente un caso particularmente revelador. Las terrazas estudiadas por Sandor et al. (2022) fueron compartimentadas para distribuir cantidades limitadas de agua procedentes principalmente de manantiales. En condiciones hiperáridas, la irrigación era indispensable para mantener la agricultura. Este fenómeno significa que los campos no constituían unidades independientes: formaban parte de sistemas integrados en los cuales fuente de agua, canal, parcela, suelo y organización del trabajo estaban funcionalmente relacionados. El cultivo en ambientes desérticos no consistía, por tanto, en vencer la aridez mediante una única innovación espectacular, sino en administrar cuidadosamente recursos escasos mediante numerosas intervenciones complementarias.

Esta lógica se relacionaba con otra característica fundamental de las economías andinas: la diversidad altitudinal. El modelo de “control vertical” formulado por Murra (1972) mostró que diferentes poblaciones buscaron acceder a recursos producidos en pisos ecológicos distintos. Si bien el modelo ha sido posteriormente discutido, matizado y adaptado a diferentes contextos, conserva un importante valor explicativo: recuerda que las sociedades andinas no dependían necesariamente de un único ambiente productivo. Maíz, papa, quinua y otros productos poseían requerimientos ecológicos distintos, de manera que diversificar territorialmente la producción contribuía también a gestionar riesgos derivados de heladas, sequías y variaciones climáticas.

La respuesta a la pregunta que encabeza este ensayo puede, entonces, formularse con mayor precisión: sí existió agricultura bajo dominio inca en ambientes extremadamente áridos, pero esto no significa que los incas hicieran florecer indiscriminadamente el desierto mediante una tecnología milagrosa. Cultivaron allí donde combinaciones específicas de agua, suelo, infraestructura y trabajo permitían hacerlo. En algunos casos aprovecharon sistemas anteriores; en otros los ampliaron o reorganizaron. El logro histórico reside precisamente en esa capacidad de transformar condiciones locales mediante conocimientos acumulativos. Convertirla en una narrativa de “ingeniería imposible” o de tecnologías misteriosamente avanzadas termina, paradójicamente, ocultando aquello que hace verdaderamente interesante a la agricultura andina: su carácter social, histórico y experimental en un sentido amplio.

5. MORAY: ¿UN LABORATORIO AGRÍCOLA INCA?

Pocos sitios representan mejor esta tensión entre evidencia e interpretación que Moray. El complejo se localiza a más de 3.300 metros de altitud, cerca de Maras, y está constituido por grandes depresiones naturales modificadas mediante terrazas concéntricas. Su geometría es extraordinaria: las superficies cultivables descienden escalonadamente hacia el centro y se encuentran asociadas con elementos hidráulicos. La combinación de profundidad, orientación, exposición solar y circulación del aire genera variaciones microambientales entre diferentes sectores. Estas características explican por qué se desarrolló la hipótesis de que el sitio habría servido para estudiar el comportamiento de cultivos bajo distintas condiciones.

Uno de los trabajos más importantes sobre el sitio de Moray es el de Wright et al. (2011), quienes analizaron su ingeniería, topografía y sistemas relacionados con el manejo del agua. Las propias interrogantes planteadas en esta investigación – sitio religioso, estación agrícola u otra combinación funcional – muestran que la interpretación histórica

no es tan sencilla como frecuentemente aparece en textos divulgativos. En esta línea, Esenarro et al. (2026) constataron que la configuración geométrica de las terrazas de Moray genera condiciones microclimáticas diferenciadas, asociadas con factores como la profundidad, la exposición solar, el drenaje y la humedad. Estos hallazgos refuerzan la existencia de una estrecha relación entre arquitectura, ambiente y manejo agrícola, aunque no permiten demostrar, por sí solos, que el sitio funcionara específicamente como un laboratorio agrícola.

El problema aparece cuando estas evidencias se convierten en una narración mucho más específica: los incas habrían llevado semillas procedentes de diferentes regiones a Moray, las habrían sembrado en distintos niveles, habrían comparado sistemáticamente los resultados y posteriormente distribuido las variedades adaptadas por todo el imperio. Esta reconstrucción es posible, pero cada uno de esos pasos requeriría evidencias independientes. La existencia de microclimas demuestra diferencias ambientales; la existencia de terrazas demuestra modificación del terreno; los canales demuestran gestión hidráulica. Ninguna de estas evidencias, considerada aisladamente, demuestra necesariamente un programa institucional de experimentación comparable con una estación agronómica moderna.

Aquí reside una distinción epistemológica fundamental. Que Moray pudiera facilitar la observación de cultivos sometidos a condiciones diferentes no demuestra automáticamente que esa fuera su función principal, exclusiva o siquiera permanente. Los sitios incas podían articular dimensiones productivas, políticas, rituales y simbólicas. En este sentido, Bray (2015) advierte que las sociedades andinas no necesariamente establecían una separación entre lo sagrado y lo secular equivalente a la desarrollada en las sociedades occidentales modernas. Esta consideración resulta particularmente pertinente para Moray, pues reducir el sitio a una única función puede proyectar categorías actuales sobre una sociedad cuya relación entre agricultura, religión y organización política respondía a lógicas diferentes. Por ello, el concepto de “laboratorio” puede resultar una metáfora útil para interpretar determinadas características del sitio, siempre que no se confunda con una función arqueológicamente demostrada en todos sus detalles.

La arqueobotánica ofrece precisamente una vía para avanzar más allá de las analogías. Los análisis de fitolitos, polen, almidones, semillas y otros restos pueden permitir identificar cultivos y reconstruir prácticas agrícolas específicas. Handley et al. (2024), a partir de estudios recientes de terrazas prehispánicas del valle de Chichas, en los Andes centro-sur peruanos, muestran el potencial de combinar evidencias arqueológicas y paleoambientales para estudiar prácticas agrícolas y circulación de plantas. Aplicada sistemáticamente a Moray, una aproximación de este tipo permitiría

contrastar con mayor precisión la hipótesis experimental: no bastaría con constatar que podían existir microclimas, sino que sería necesario demostrar qué plantas se cultivaron, cuándo y con qué patrones de distribución espacial.

Moray resulta así más interesante cuando se acepta la incertidumbre que cuando se elimina. Las evidencias disponibles permiten sostener razonablemente que constituye un paisaje intensamente diseñado, relacionado con agricultura, manejo hidráulico y creación de condiciones ambientales diferenciadas. Resulta igualmente razonable plantear que estas características pudieron utilizarse para observar o favorecer cultivos bajo diferentes condiciones. Pero definirlo categóricamente como una “estación experimental agrícola” organizada para reproducir los pisos ecológicos del imperio supera, por ahora, aquello que puede demostrarse de manera inequívoca. Esta cautela no disminuye el conocimiento inca; al contrario, permite estudiarlo sin convertir hipótesis en certezas históricas.

6. CONCLUSIÓN

La agricultura desarrollada en los Andes antes y durante el Imperio inca demuestra que la producción de alimentos no dependió exclusivamente de encontrar ambientes naturalmente favorables. En determinados lugares fue necesario construirlos. Terrazas, canales, reservorios, manejo de suelos y aprovechamiento complementario de distintos pisos ecológicos transformaron profundamente el territorio. La pregunta acerca de si los incas cultivaron en el desierto posee, por tanto, una respuesta afirmativa, siempre que se introduzca una precisión fundamental: pudieron cultivar en ciertos ambientes áridos porque existían fuentes de agua susceptibles de ser administradas y porque comunidades andinas habían desarrollado tecnologías y formas de organización capaces de transformar sectores concretos del paisaje.

Estas transformaciones tampoco deben atribuirse exclusivamente al Estado inca. Una buena parte de las tecnologías agrícolas poseían antecedentes anteriores al Tawantinsuyu. La expansión imperial incorporó territorios donde existían tradiciones locales de irrigación, construcción de terrazas y manejo de cultivos. Su importancia histórica reside parcialmente en haber articulado, ampliado y reorganizado esos conocimientos dentro de una formación política extraordinariamente extensa. El paisaje agrícola inca fue, en consecuencia, simultáneamente imperial y local; innovador y heredero de tradiciones anteriores. Reconocer esta profundidad temporal evita presentar la historia agrícola andina como producto repentino de una civilización excepcional desconectada de sus predecesoras.

La evidencia geoarqueológica reciente permite observar materialmente esta transformación. Los estudios de terrazas del desierto de Atacama muestran modificaciones deliberadas de suelos y distribución controlada de agua; las investigaciones efectuadas en los Andes peruanos revelan complejas historias de formación y utilización de terrazas; y nuevas técnicas arqueobotánicas y paleoambientales permiten reconstruir con mayor precisión qué ocurrió en estos paisajes. La imagen que emerge no es la de una naturaleza conquistada, sino la de paisajes progresivamente producidos mediante conocimiento, infraestructura y trabajo.

Moray constituye, finalmente, una advertencia sobre los límites de nuestras propias interpretaciones. Existen buenas razones para relacionarlo con agricultura especializada y aprovechamiento de diferencias microambientales. No obstante, existe una distancia entre reconocer esas características y afirmar que conocemos con precisión el protocolo de experimentación allí desarrollado. El concepto de “laboratorio agrícola” puede funcionar como hipótesis interpretativa, pero debería acompañarse de una explicación sobre su grado de certeza. La arqueología gana capacidad explicativa cuando distingue entre lo que los restos demuestran, lo que permiten inferir razonablemente y las cuestiones que todavía permanecen abiertas a discusión.

En definitiva, la principal enseñanza de la agricultura inca quizá no consista en que los incas “vencieron” al desierto o dominaron una naturaleza hostil. Su logro fue más complejo: desarrollaron y heredaron conocimientos capaces de leer diferencias locales, administrar riesgos, conducir agua, construir suelo cultivable y articular ambientes ecológicamente diversos. Moray representa magníficamente tanto esa capacidad como los riesgos de idealizarla. Comprender el paisaje agrícola andino exige, por ello, dos ejercicios complementarios: reconocer la extraordinaria sofisticación de las sociedades que lo construyeron y conservar suficiente cautela para no atribuirles, sin evidencia suficiente, aquello que nuestra imaginación desea encontrar en sus obras.

REFERENCIAS

- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19-32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Bray, T. (2015). Andean wak'as and alternative configurations of persons, power, and things. En T. Bray (Ed.), *The archaeology of wak'as: Explorations of the sacred in the Pre-Columbian Andes* (pp. 3-20). University Press of Colorado. <https://www.jstor.org/stable/j.ctt130hkws>
- Denevan, W. (2001). *Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198234074.001.0001>

Esenarro, D., Hidalgo, C., Vilchez, J., Yabar, G., Vilchez, T., Zapata, P., Bermudez, D., & Camayo, A. (2026). Microclimates, geometry, and constructive sustainability of the Inca agricultural terraces of Moray, Cusco, Peru. *Heritage*, 9(2), 56. <https://doi.org/10.3390/heritage9020056>

Frogley, M., Chepstow, A., Thiele, G., & Aucca, C. (2025). Trees, terraces and llamas: Resilient watershed management and sustainable agriculture the Inca way. *Ambio*, 54, 793-807. <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02121-5>

Grana, L., Lanzelotti, S., Arévalo, V., Tesio, A., & Maidana, N. (2023). Identifying pre-Hispanic water storages in agricultural areas of south-central Andes through diatom evidence. *Archaeometry*, 65(2), 391-408. <https://doi.org/10.1111/arcm.12817>

Handley, J., Branch, N., Meddens, F., Simmonds, M., & Iriarte, J. (2024). Pre-Hispanic terrace agricultural practices and long-distance transfer of plant taxa in the southern-central Peruvian Andes revealed by phytolith and pollen analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 33, 375-391. <https://doi.org/10.1007/s00334-023-00946-w>

Leceta, F., Binder, C., Mader, C., Mächtle, B., Marsh, E., Dietrich, L., Reindel, M., Eitel, B., & Meister, J. (2024). The impact of agriculture on tropical mountain soils in the western Peruvian Andes: A pedo-geoarchaeological study of terrace agricultural systems in the Laramate region (14.5° S). *SOIL*, 10, 727-761. <https://doi.org/10.5194/soil-10-727-2024>

Mader, C., Godde, P., Behl, M., Binder, C., Hägele, E., Isla, J., Leceta, F., Lyons, M., Marsh, E., Odenthal, R., Fernengel, E., Stryjski, P., Weber, A., Reindel, M., & Meister, J. (2024). An integrative approach to ancient agricultural terraces and forms of dependency: The case of Cutamalla in the prehispanic Andes. *Frontiers in Environmental Archaeology*, 3, 1328315. <https://doi.org/10.3389/fearc.2024.1328315>

Murra, J. (1972). El "control vertical" de un máximo de pisos ecológicos en la economía de las sociedades andinas. En I. Ortiz de Zúñiga, *Visita de la provincia de León de Huánuco en 1562* (Vol. 2, pp. 429-476). Universidad Nacional Hermilio Valdizán.

Sandor, J., Huckleberry, G., Hayashida, F., Parcerro, C., Salazar, D., Troncoso, A., & Ferro, C. (2022). Soils in ancient irrigated agricultural terraces in the Atacama Desert, Chile. *Geoarchaeology*, 37(1), 96-119. <https://doi.org/10.1002/gea.21834>

Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., ... Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467-473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>

Wright, K., Wright, R., Valencia, A., & McEwan, G. (2011). *Moray: Inca engineering mystery*. American Society of Civil Engineers.

SOBRE O ORGANIZADOR

Eduardo Eugênio Spers realizou pós-doutorado na Wageningen University (WUR), Holanda, e especialização no IGIA, França. Possui doutorado em Administração pela Universidade de São Paulo (USP). Foi Professor do Programa de Mestrado e Doutorado em Administração e do Mestrado Profissional em Comportamento do Consumidor da ESPM. Líder do tema Teoria, Epistemologia e Métodos de Pesquisa em Marketing na Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração (ANPAD). Participou de diversos projetos de consultoria e pesquisa coordenados pelo PENSE e Markestrat. É Professor Titular no Departamento de Economia, Administração e Sociologia, docente do Mestrado em Administração e Coordenador do Grupo de Extensão MarkEsalq no campus da USP/Esalq. Proferiu palestras em diversos eventos acadêmicos e profissionais, com diversos artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, livros e capítulos de livros sobre agronegócios, com foco no marketing e no comportamento do produtor rural e do consumidor de alimentos.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Actinomicetos 108, 109, 112, 113

Aggregation 81, 83, 84, 86, 87, 89, 92, 96, 99, 101, 102, 103, 104, 105

Agricultura 33, 35, 36, 37, 38, 40, 43, 45, 46, 47, 48, 54, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 122, 137, 151, 157, 174, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 196, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210

Agricultura inca 200, 201, 204, 206, 210

Agricultura regenerativa 65, 66, 67, 68, 69, 71, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80

Agronegocio 33, 37, 38, 40, 44, 46

Análisis FODA 168, 170

Arroz 34, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 131, 132, 133, 134, 135, 136

B

Biodiversidad edáfica 66, 71

Biodiversity and biological monitoring 116

Biofertilizantes 120, 132, 133

C

Cadastral 1, 6, 14, 15, 16, 26

Climate change 1, 2, 3, 6, 7, 8, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 80, 198, 199

Coastal flooding 1

Colapso sociopolítico 187

Collected material available 116

Colombian Caribbean 1, 3, 4, 30, 121

Comercialización 41, 168, 170, 171, 172, 173, 174, 182

Comportamento animal 151, 152, 162, 163, 164

Conservación ambiental 43, 50

Conservation and protection of species 116

D

Deforestación 187, 188, 189, 190, 191, 192, 195, 196

Desarrollo rural 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 42, 46, 47, 48, 49, 137, 167, 168, 174, 186

Desarrollo sostenible 30, 50

E

Economía circular 176, 184, 185
Ecosystem assessment 116, 165
Ecosystem engineers 81, 95
Ecoturismo 50, 52, 60, 62
Eficiencia de fertilización 120
Encabeçamento 151
Espectrofotometría 109, 110, 111, 112
Extensión rural 168, 169

F

Fenologia 151, 154, 159, 160, 161
Fish farming 139, 140, 148
Food fish 140

G

GPS tracking 151, 152

H

Hyphae 81, 87, 88, 89, 92, 93, 94, 100, 101

I

Impacts 1, 2, 3, 4, 7, 24, 26, 27, 28, 31, 47, 98, 101, 105, 198
Ingeniería de proyectos 176
Irrigación 200, 201, 202, 203, 205, 206, 209

K

Kraft 108, 109, 111, 112, 113

L

La Malinche 50, 51, 52, 53, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64

M

Mayas 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 195, 196, 197
Medios selectivos 109, 112, 113
Microorganismos beneficiosos 120, 123, 124, 125, 127, 130, 131, 132, 135

Modelo de acciones de sociología cultural 50

Moray 200, 201, 202, 203, 204, 207, 208, 209, 210, 211

N

NPK 120, 121, 123, 124, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 137

Nutrición vegetal 120, 123, 132

O

Organosolv 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114

Ornamental fish 140, 149

P

Paisaje andino 200

Palma de aceite 33, 34, 36, 38, 41, 44, 45, 46

Pastoreio extensivo 150, 151, 152, 157

Pequeños productores 37, 38, 40, 44, 45, 47, 78, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174

Pisoteio 151, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 163, 164

Procesos termoquímicos 176

R

Raças autóctones 150, 151, 153, 159, 164

Remates ganaderos 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173

Residuos agroindustriales 176

Resiliencia agroecológica 66

S

Salud del suelo 66, 67

Sequía 72, 77, 125, 187, 189, 190, 191, 193, 194, 195, 196

Soberanía alimentaria 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47

Soil biodiversity 81, 90, 92, 106

Soil degradation 81, 87, 99, 101, 106

Sostenibilidad 47, 53, 66, 67, 71, 82, 120, 170, 172

Sostenibilidad agrícola 66

Sustainable aquaculture 140

T

Terrazas agrícolas 200, 204

Territorialidades rurales 33, 36, 38, 39, 42, 46

V

Valorización de biomasa 176

Vulnerability 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 101, 187



EDITORA
ARTEMIS

2026