

VOL IV

Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais

Eduardo Spers
(Organizador)



EDITORA
ARTEMIS

2025

VOL IV

Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais

Eduardo Spers
(Organizador)



EDITORA
ARTEMIS

2025



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 Emilas Darlene Carmen Lebus, *Universidad Nacional del Nordeste/ Universidad Tecnológica Nacional*, 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 Alborno, *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 Godínez, 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 Augusto de Lima Nobre, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 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. Sérgio 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)

E87 Estudos em ciências agrárias e ambientais IV [livro eletrônico] /
Organizador Eduardo Eugênio Spers. – Curitiba, PR: Editora
Artemis, 2025.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

Edição bilíngue

ISBN 978-65-81701-59-8

DOI 10.37572/EdArt_310725598

1. Ciências agrárias. 2. Ciências ambientais. 3.
Sustentabilidade. 4. Agricultura sustentável. 5. Manejo de recursos
naturais. I. Spers, Eduardo Eugênio. II. Título.

CDD 630

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422



APRESENTAÇÃO

É com grande satisfação que apresentamos o volume IV da coletânea **Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais**, resultado do esforço colaborativo de pesquisadores de diferentes regiões e instituições, que compartilham aqui reflexões, dados e contribuições relevantes para o avanço do conhecimento técnico-científico em suas áreas de atuação.

Este volume reúne 13 trabalhos organizados em cinco eixos temáticos que refletem a diversidade e complexidade do campo agrário e ambiental contemporâneo: Sistemas de Produção Aquático e Animal; Sustentabilidade Ambiental e Conservação de Recursos Naturais; Sistemas de Produção Vegetal e Agricultura de Precisão e Educação e Inovação no Meio Agrário.

Os temas abordados vão desde o manejo sustentável de recursos naturais, passando por inovações tecnológicas na agricultura e aquicultura, até discussões sobre formação profissional e segurança sanitária nas cadeias produtivas. Essa pluralidade é o reflexo da crescente interdisciplinaridade que caracteriza os estudos agrários e ambientais hoje – exigindo diálogos entre a ciência, a tecnologia, a educação, a economia e a sociedade.

Além da qualidade dos estudos apresentados, destacamos o compromisso dos autores com a pesquisa aplicada, a sustentabilidade e a busca por soluções adaptadas às realidades locais, muitas vezes desafiadoras. A presença de autores da América Latina e Europa também fortalece o caráter internacional da obra, fomentando o intercâmbio de experiências e metodologias.

Agradecemos a todos os autores pela confiança em compartilhar seus trabalhos conosco. Que esta publicação possa inspirar novas pesquisas, colaborações e, acima de tudo, práticas que contribuam com a construção de sistemas agrários e ambientais mais resilientes, justos e inovadores.

Desejamos a todos uma excelente leitura!

Eduardo Eugênio Spers

SUMÁRIO

SISTEMAS DE PRODUÇÃO AQUÁTICO E ANIMAL

CAPÍTULO 1..... 1

EFFECTS OF INCLUSION OF PROBIOTIC *PEDIOCOCCUS ACIDILACTICI* IN DIETS WITH HIGH LEVELS OF SOYBEAN MEAL IN GROWTH AND INTERLEUKINS GENE EXPRESSION OF RAINBOW TROUT (*Oncorhynchus mykiss*)

Jesus Manuel Segura-Campos

Luis Héctor Hernández-Hernández

Madison S. Powell

Mario Alfredo Fernández-Araiza

Susana Alejandra Frías-Gómez

Mauricio Castillo-Domínguez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255981

CAPÍTULO 2..... 13

INTRASPECIFIC DENSITY EFFECT ON GROWTH OF *Marphysa* “SP”. JUVENILES

João Pedro Monteiro Ferreira Garcês

Pedro Marques Pousão Ferreira

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255982

CAPÍTULO 3..... 28

MINI-ECOSISTEMA ACUÁTICO COMO MODELO DE ESTUDIO EN ECOFARMACOVIGILANCIA

Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez

María Magali Guillen-Morales

David Yanez-Nava

María Esther Mena-Espino

Roger Enrique Chan-Martínez

Dylan Manuel Ferrer-Dzul

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255983

CAPÍTULO 4..... 38

CONTROL PROGRAM OF SHEEP COCCIDIOSIS IN THE PRODUCTION CHAIN FROM THE BREEDER TO THE CONSUMER

Ivan Pavlović

Aleksandra Tasić

Jovan Bojkovski

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255984

SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E CONSERVAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS

CAPÍTULO 5..... 68

DETERMINACIÓN ANALÍTICA DEL NÚMERO DE INTERVALOS DE CLASES DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES

José German Flores-Garnica

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255985

CAPÍTULO 6..... 86

PHYTOCLIMATIC DYNAMICS IN NATURAL OROMEDITERRANEAN FORESTS OF *Pinus sylvestris* L. IN THE CENTRAL SPANISH IBERIAN PENINSULA. SUITABILITY AND VERSATILITY UNDER CLIMATE CHANGE

Carmen Allué Camacho

Javier M. García López

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255986

CAPÍTULO 7..... 102

USO DE HUMUS DE LOMBRIZ PARA REVITALIZAR SUELOS DETERIORADOS POR PRODUCTOS QUÍMICOS

Julian Rene Perdomo Ramos

Tania Paola Perdomo Ramos

José Francisco Machado Carrillo

Edison Arturo Perdomo Ramos

Jirley Vanessa Rojas Gómez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255987

SISTEMAS DE PRODUÇÃO VEGETAL E AGRICULTURA DE PRECISÃO

CAPÍTULO 8..... 125

EL SISTEMA PRODUCTIVO ALGODÓN (*GOSSYPIMUM HIRSUTUM* L.) EN LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO

Ignacio Orona Castillo

Cirilo Vázquez Vázquez

Apolinar González Mancilla

Joaquín Osornio Córdova

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255988

CAPÍTULO 9.....133

PRECIO DE MERCADO Y COSTOS DE CONSERVACIÓN DE SEMILLAS DE *Cedrela Odorata* L. DE POBLACIONES VULNERABLES AL CAMBIO CLIMÁTICO, MÉXICO

Salvador Sampayo-Maldonado

Joel Rodríguez-Zúñiga

Horacio Bautista-Santos

Fabiola Sánchez Galván

Juan Sebastian Rodríguez Bravo

Oscar Del Ángel Piña

 https://doi.org/10.37572/EdArt_3107255989

CAPÍTULO 10.....153

CALCIUM CARBONATE APPLIED TO THE SUBSTRATE AND FOLIAR SPRAY IN TOMATO AND BELL PEPPER

Juan Manuel Soto Parra

Esteban Sánchez Chávez

Omar Cástor Ponce García

Rosa María Yáñez Muñoz

Nubia Guadalupe Torres Beltrán

Julio César Oviedo Mireles

Linda Citlalli Noperi Mosqueda

 https://doi.org/10.37572/EdArt_31072559810

CAPÍTULO 11.....163

AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARROZ: MAPEO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO Y SU IMPACTO CON EL RENDIMIENTO DE GRANO

Sergio Salgado Velázquez

Fabiola Olvera Rincón

Diana Rubi Ramos López

Pablo Ulises Hernández Lara

 https://doi.org/10.37572/EdArt_31072559811

CAPÍTULO 12179

LA ENSEÑANZA AGRICOLA Y LA FORMACIÓN DEL INGENIERO AGRÓNOMO Y SU IMPORTACIÓN EN LA AGRICULTURA: PASADO, PRESENTE Y FUTURO

José Luis Gutiérrez Liñán
Carmen Aurora Niembro Gaona
Alfredo Medina García
Oscar Arce Cervantes

 https://doi.org/10.37572/EdArt_31072559812

CAPÍTULO 13192

SECOND GENERATION FRUGAL INNOVATION - TOWARDS APPROPRIATE FRUGAL AGRICULTURAL INNOVATION FOR FAMILY FARMS IN ANGOLA

Jone Heitor Sebastião
Jean-Pierre Caliste
Henri Dou

 https://doi.org/10.37572/EdArt_31072559813

SOBRE O ORGANIZADOR..... 210

ÍNDICE REMISSIVO 211

CAPÍTULO 1

EFFECTS OF INCLUSION OF PROBIOTIC *PEDIOCOCCUS ACIDILACTICI* IN DIETS WITH HIGH LEVELS OF SOYBEAN MEAL IN GROWTH AND INTERLEUKINS GENE EXPRESSION OF RAINBOW TROUT (*Oncorhynchus mykiss*)

Data de submissão: 26/06/2025

Data de aceite: 11/07/2025

Susana Alejandra Frías-Gómez

Laboratorio de Producción Acuícola
Facultad de Estudios Superiores Iztacala
Universidad Nacional Autónoma de México
Tlalnepantla, Estado de México,
Mexico
<https://orcid.org/0000-0002-7950-7757>

Jesus Manuel Segura-Campos

Doctorado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México
<https://orcid.org/0000-0001-5550-2604>

Luis Héctor Hernández-Hernández

Laboratorio de Producción Acuícola
Facultad de Estudios Superiores Iztacala
Universidad Nacional Autónoma de México
Tlalnepantla, Estado de México, Mexico
<https://orcid.org/0000-0001-8404-2811>

Madison S. Powell

Hagerman Fish Culture Experimental Station
Aquaculture Research Institute
University of Idaho
Hagerman, Idaho, USA
<https://orcid.org/0000-0002-1851-3168>

Mario Alfredo Fernández-Araiza

Laboratorio de Producción Acuícola
Facultad de Estudios Superiores Iztacala
Universidad Nacional Autónoma de México
Tlalnepantla, Estado de México,
Mexico
<https://orcid.org/0000-0002-9138-2707>

Mauricio Castillo-Domínguez

Laboratorio de Producción Acuícola
Facultad de Estudios Superiores Iztacala
Universidad Nacional Autónoma de México
Tlalnepantla, Estado de México,
Mexico
<https://orcid.org/0009-0004-7558-2196>

ABSTRACT: A 90-days feeding trial was performed to establish the effects of the probiotic *Pediorococcus acidilactici* added to diets with high contents of soybean meal in the growth performance, survival rate, proximate composition, and gene expression of the interleukins 1 β , 4, 8, 10, and 21 of rainbow trout fingerlings. A basal diet (400 g/kg diet of soybean meal) was added with *P. acidilactici* at 0.2, 2, and 20 g/kg and fed to triplicate groups with initial weight of 2.3 $\pm$ 0.1 g (mean $\pm$ SE). Growth performance and survival improved with increasing inclusions of the probiotic, while gene expression of the interleukins *il-4* and *il-10* were upregulated as the probiotic increased in the diets. Concentration of *P. acidilactici* adequate for using with high levels

of soybean meal inclusions was of 20 g/kg, as it helps to improve the growth, survival and upregulate the expression of the interleukins IL-4 and IL-10.

KEYWORDS: fingerlings; plant-origin protein; survival; rainbow trout.

1. INTRODUCTION

The production of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) relies in aquafeeds that use marine fish derived products as the main sources of protein and lipids (Hardy 2010). The fish meal and oil production will be stable during the next decades, but the increasing demand is surpassing the supply (Gatlin et al., 2007), causing increasing prices of aquafeeds and possibly, their use is no longer viable for aquaculture production (Callet et al., 2017). Plant-based ingredients are the most viable sources to substitute fish ingredients and particularly, soybean meal (SBM) has a high protein content and a well-balanced amino acid profile (Gatlin et al., 2007), is widely available and has low cost (Tacon and Metian 2008). However, inclusion of SBM has been limited due to several negative effects in carnivorous fish, such as retarded growth performance, poor digestibility and in extreme cases, non-infectious enteritis and death (Sealey et al., 2009; Laining et al., 2010; Krogdahl et al., 2010). Thus, higher inclusions of SBM in aquafeeds may require additives which help to improve digestibility proper use of nutrients (Sánchez et al. 2015). Probiotics can help in reducing the negative effects of SBM (Sealey et al., 2009) and their effects in the diets have been poorly investigated: Sealy et al. (2009) reported that fingerlings of rainbow trout tolerate increased levels of SBM by feeding a commercial probiotic including species of yeast and bacteria, while Sánchez et al. (2015) found that inclusion of live yeast (*Saccharomyces* sp.) improved the growth of juvenile rainbow trout when fed a diet with SBM as the main source of protein.

On the other hand, the probiotic *Pediococcus acidilactici* has been reported to improve morphology of intestinal microvilli, enterocyte endocytic activity, reduce intestinal alterations caused by bacterial infection (Merrifield et al., 2010; Merrifield et al., 2011; Harper et al., 2011, Al-Hisnawi et al., 2019). In zebrafish (*Danio rerio*), use of *P. acidilactici* improved the growth performance, immune responses, and reproductive performance (Arani et al., 2019; Arani et al., 2021). Torrecillas et al. (2018) reported that use of *P. acidilactici* and mannoooligosaccharides in juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) improved the growth and disease resistance when fed diets with low inclusion of fish meal and oil. Thus, *P. acidilactici* seems to have a positive effect on intestine health and may be included in feeds with high content of plant-origin proteins and the objective of the present research was to determine the effects of different concentrations of *P. acidilactici* added to diets with high contents of SBM in the growth performance, survival

rate, proximate composition, and gene expression of the interleukins 1 β , 4, 8, 10, and 21 of fingerlings of rainbow trout.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. EXPERIMENTAL DIETS

The formulation of the basal diet was done according with Cruz et al. (2011), with soybean meal (providing 75% of the protein portion) and fish meal (providing 25% of the protein portion) as protein sources (Table 1). *Pediococcus acidilactici* (Bactocell®, Lallemand, Canada, 1 x10¹⁰ CFU/g) was added to the basal diet with at 0.2 (*Pa*0.2), 2 (*Pa*2) and 20 (*Pa*20) g/kg of diet, by spraying the bacteria previously diluted in distilled water, following the manufacturer´s instructions. The basal diet without addition of bacteria was used as control.

Table 1. Basal composition of the experimental diets fed to rainbow trout fingerlings. The proximate composition was of (% dry weight basis $\pm$ SD); crude protein, 42.1 $\pm$ 1.0; crude lipids. 11.2 $\pm$ 0.7, and ash, 9.8 $\pm$ 0.3.

Ingredients	g/kg
Fish meal ¹	200
Soybean meal ²	400
Cod liver oil ³	50
Soybean lecithin ³	50
Dextrin ³	100
Mixture of vitamin and minerals ⁴	40
Wheat gluten ⁵	50
α -celullose ⁵	110

¹Vimifos S.A. de C.V., Mexico

²Pisa S.A. de C.V., Mexico

³Drotasa S.A. de C.V., Mexico

⁴Sigma Aldrich Co., MO, USA

⁵DSM Nutrition Products of Mexico, Mexico

2.2. EXPERIMENTAL ORGANISMS

Organisms of 60-days after hatching were obtained from the commercial farm “El Xote” (municipality of Jilotzingo, State of Mexico, Mexico) and transported to Laboratorio de Producción Acuicola ubicada at the municipality of Tlalnepantla, Estado de Mexico. Organisms were kept in 1000-L tanks with continuous filtration, aeration and fed with a commercial feed (Growth-fish trucha, Malta Texco de Mexico S.A. de C.V., Mexico) for three weeks until the start of the feeding trial.

2.3. FEEDING TRIAL

The feeding trial was performed in a recirculating system with 12 polypropylene tanks of 100-L each. Thirteen fish with an initial weight of 2.3 ± 0.1 g (mean $\pm$ SE) were randomly allocated in each tank. Each diet was fed to triplicate tanks at 7% of the total body weight and daily ration was divided into two equal feedings at 09:00 and 16:30 hours. Organisms were weighed every 10 days, and the ration size was adjusted accordingly. During the trial, water conditions were (mean $\pm$ SE) as follows: dissolved oxygen, 5.0 ± 0.1 mg/L; ammonia, 0.01 ± 0.001 mg/L; pH, 8.1 ± 0.2 and temperature of 19 ± 2 °C. All tanks were maintained under natural cycle of 12 h light, 12 h darkness. The trial was conducted for a period of 90 days and at the end, the organisms were starved for 24 h and weighed to obtain the growth performance. Then, 10 fish of each treatment were euthanized with an overdose of clove oil. Samples of liver and muscle were obtained for protein and lipid contents, while distal intestine samples were taken for the gene expression analysis.

2.4. PROXIMATE COMPOSITION

Protein contents of muscle and liver were determined by acid digestion and further distillation according with the AOAC (1990) methods, while lipids were extracted with chloroform and methanol and determined following the technique reported by Blight and Dyer (1959).

2.5. QUANTITATIVE RT-PCR ANALYSIS

Total RNA from the intestine tissue samples was extracted according with Blaufuss et al. (2020), using TRIzol reagent (Invitrogen, Carlsbad, USA) and quantified with an RNA BR assay kit (Invitrogen, Carlsbad, USA) in a Qubit 4 (Invitrogen, Carlsbad, USA) fluorometer. Samples of RNA were diluted to contain the same quantity nuclease-free water and then, treated with DNase (DNase I, Invitrogen, Carlsbad, USA) and reverse transcribed into cDNA (High-capacity cDNA reverse transcription kit, ThermoFisher Scientific, Waltham, USA) according with the manufacturer instructions. The resulting samples with cDNA were stored at -80 °C until further analysis. The primers of interleukins 4 (*il-4*), 8 (*il-8*), 10 (*il-10*), and 21 (*il-21*) were designed to be intron-free, while those of interleukin 1 β (*il-1 β*) were reported by Vélez-Calabria et al. (2021) (Table 2).

Each sample was amplified by duplicates in 0.1 ml microtubes by using a MyGo mini-RT-PCR system (IT-IS International, Stokesley, England) and a SensiFAST SYBER no-ROX kit (Meridian Bioscience, Memphis, USA) with melt curves to assess product

specificity. The genes were normalized against β -actin expression and quantified using the $\Delta\Delta C_t$ methodology reported by Livak and Schmittgen (2001).

Table 2. Primer sequences of rainbow trout genes used for quantitative polymerase chain reaction.

Gene	Accession	Primers
<i>il-1β</i>	AJ223954	f. ACA TTG CCA ACC T CA TCA TCG r. TTG AGC AGG TCC TTG TCC TTG
<i>il-4</i>	AB574337	f. ACC ACC ACA AAG TGC AAG GAG TTC T r. CAC CTG GTC TTG GCT CTT CAC AAC
<i>il-8</i>	AJ279069	f. CTC GCA ACT GGA CTGACA AA r. TGG CGT ACA TCC TGA TGC TC
<i>il-10</i>	AB118099	f. GGA TTC TAC ACC ACT TGA AGA GCC C r. GTC GTT GTT GTT CTG TGT TCT GTT GT
<i>il-21</i>	FM883701	f. CAA CAG TGT GAT GTC GAA CGC TC r. CCT TGG CAG ACT GTT TTC TCT CTC C
<i>β-actin</i>	AJ438158.1	f. TGG GGC AGT ATG GCT TGT ATG r. CT. TGG CAC CCT AAT CAC CTC T

2.6. STATISTICAL ANALYSIS

Values of growth performance, protein and lipids contents of muscle and liver, and gene expression were tested for normality and homoscedasticity with the Kolmogorov-Smirnov test and Levene’s test, respectively. Then, one-way ANOVA was performed using Prism software (v. 10.2.2, GraphPad Software, San Diego, CA, USA). Significant differences were evaluated with the post hoc with a Fisher’s LSD test, with a significant level of 5% ($P < 0.05$) for each set of comparisons.

3. RESULTS

Growth performance and survival rates of juvenile rainbow trout fed diets additions with soybean and the inclusion of different concentrations of *P. acidilactici* are show in Table 3. After 90 days, weight gain (WG) was significantly lower in organisms fed with diets *Pa*0.2 and *Pa*2 when compared with the juveniles fed the *Pa*20. Concentration. A similar trend was observed for the values of specific growth rate (SGR). Regarding feed intake (FI) and feed conversion efficiency (FCE) were found no significant differences were observed, but higher values were observed in the fish fed Control diet. Survival rate was higher showed direct relationship with *P. acidilactici* concentration, but no significant differences were observed among the treatments.

Table 3. Growth performance and survival of rainbow trout fingerlings fed diets with high content of soybean meal and the addition of several concentrations of *Pediococcus acidilactici* for a period of 90 days. Data are the means of triplicate groups $\pm$ SE. Means with different letters in the same column differ significantly ($P < 0.05$).

	FW (g)	WG (%)	SGR (%/day)	FI	FCE	Survival
Control	4.7 $\pm$ 0.7	96 $\pm$ 23ab	0.7 $\pm$ 0.1ab	0.27 $\pm$ 0.05	0.5 $\pm$ 0.1	59 $\pm$ 16
Pa0.2	3.8 $\pm$ 0.3	72 $\pm$ 12b	0.5 $\pm$ 0.07b	0.20 $\pm$ 0.02	0.4 $\pm$ 0.05	64 $\pm$ 5
Pa2	3.8 $\pm$ 0.2	70 $\pm$ 3b	0.5 $\pm$ 0.02b	0.18 $\pm$ 0.01	0.4 $\pm$ 0.04	77 $\pm$ 4
Pa20	4.8 $\pm$ 0.3	110 $\pm$ 10a	0.8 $\pm$ 0.05a	0.22 $\pm$ 0.05	0.5 $\pm$ 0.04	74 $\pm$ 6

Table 4 shows protein and lipid contents in muscle and liver. Increasing protein values were observed in muscle as the probiotic concentration increased in diets, but no significant differences were observed. Regarding protein contents in liver, no significant differences were observed among the treatments. Lipid contents in muscle were significantly higher value than observed in organisms fed diet *Pa20* with respect those fed the *Pa0.2* and *Pa2*. Lipids in liver values did not show significant differences among treatments, but higher contents were observed in organisms fed diets *Pa0.2* and *Pa2*.

Table 4. Protein and lipid contents of muscle and liver of rainbow trout fingerlings fed diets with high content of soybean meal and the addition of several concentrations of *Pediococcus acidilactici* for a period of 90 days. Data are the means of triplicate groups $\pm$ SE. Means with different letters in the same column differ significantly ($P < 0.05$).

	Muscle		Liver	
	Protein	Lipid	Protein	Lipid
Control	12.8 $\pm$ 2.4	5.9 $\pm$ 1.9ab	16.6 $\pm$ 1.7	5.9 $\pm$ 1.9
Pa0.2	12.5 $\pm$ 2.1	3.9 $\pm$ 0.2ab	19.6 $\pm$ 3.4	9.2 $\pm$ 0.9
Pa2	14.3 $\pm$ 1.8	3.9 $\pm$ 0.2ab	14.5 $\pm$ 2.0	8.3 $\pm$ 1.3
Pa20	15.9 $\pm$ 0.2	7.9 $\pm$ 0.3a	15.2 $\pm$ 2.3	4.5 $\pm$ 2.1

Figure 1 shows the relative gene expression of proinflammatory interleukins (*il-1 β* , *il-8* and *il-21*) in the intestine of rainbow trout juveniles. Expressions of *il-1 β* (Figure 1A) were down regulated in the organisms fed diets Control, *Pa0.2* and *Pa2*, while treatment *Pa20* was up regulated, but no significant differences were observed. Significant higher values were found in the expression of the *il-8* when juveniles were fed with *Pa0.2* and compared with those fed with Control and *Pa20* (Figure 1B). Finally, the expression of *il-21* (Figure 1C) was down regulated in groups feeding the Control, *Pa0.2* and *Pa2* diets, but no significant differences were observed when compared with the group fed *Pa20* diet. The expression of anti-inflammatory interleukins is shown in Figure 2, and increased values of

expression of *il-4* were observed as the concentrations of the probiotic also increased, however no significant differences were observed (Figure 2a). Regardless of the different probiotic concentrations, the expression of *il-10* was significantly up regulated when compared with the fish fed the Control diet (Figure 2B).

Figure 1. Gene expression (as $\Delta\Delta Ct$ values) of proinflammatory interleukins (A) 1 β (*il-1 β*), (B) 8 (*il-8*), and (C) 21 (*il-21*) from the distal intestine of rainbow trout fingerlings fed diets with high content of soybean meal and the addition of several concentrations of *Pediococcus acidilactici* for a period of 90 days. Each bar represents the means of triplicate groups $\pm$ SE. Bars with different letters differ significantly ($P < 0.05$).

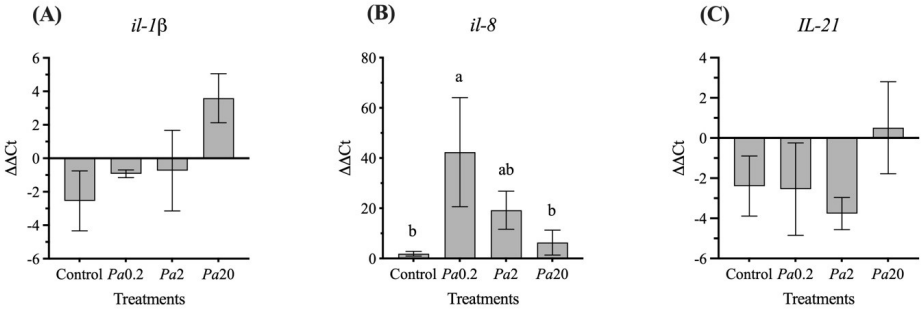
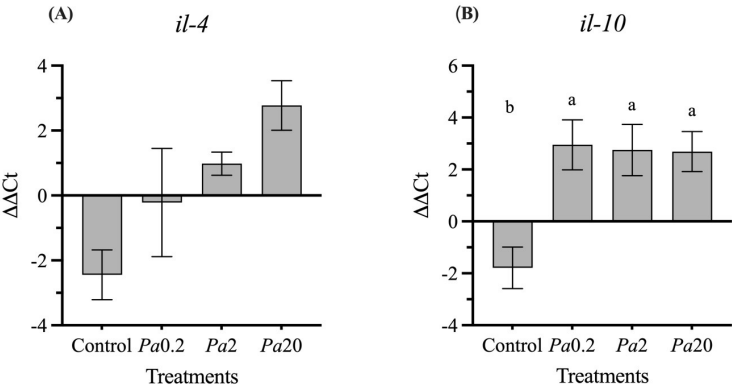


Figure 2. Gene expression (as $\Delta\Delta Ct$ values) of anti-inflammatory interleukins (A) 4 (*il-4*) and (B) 10 (*il-10*) from the distal intestine of rainbow trout fingerlings fed diets with high content of soybean meal and the addition of several concentrations of *Pediococcus acidilactici* for a period of 90 days. Each bar represents the means of triplicate groups $\pm$ SE. Bars with different letters differ significantly ($P < 0.05$).



4. DISCUSSION

Due to its high protein content, amino acid profile, availability, and relative low cost, the SBM is an alternative to fish meal as protein source in aqua feeds. However, its inclusion in high quantities is still limited as it has several negative effects in carnivorous fish, such as retarded growth performance, poor digestibility and in extreme cases, non-infectious enteritis and death (Laining et al., 2010; Krogdahl et al., 2010). The effects of

inclusion of different concentrations of the probiotic *P. acidilactici* in diets with high levels of soybean meal for rainbow trout fingerlings are presented for the first time.

Use of soybean meal as main source of protein in diets for carnivorous fish affects growth performance (Gatlin et al., 2007), due to the presence of several compounds known as antinutrients (Laining et al., 2010). Addition of enzymes (Cruz et al., 2011) or probiotics (Sánchez et al., 2015) showed to improve the growth performance. Fingerlings fed diet *Pa20* showed higher growth performance, so the inclusion of *P. acidilactici* has a positive effect on growth, which was previously reported by Merrifield et al. (2011) who fed rainbow trout with a commercial diet and Torrecillas et al. (2018) fed European sea bass with a plant-protein base diet. The positive effect of this probiotic in growth, seems to be related to the concentrations in fed, as previously reported by Arani et al. (2018) in zebrafish.

Inclusion of *P. acidilactici* did not have any effect on proximate composition of muscle and liver, with the exception for lipid contents in muscle of fingerlings fed diet *Pa20* that were significantly higher than the other treatments. However, such values are similar to lipid contents previously reported in muscle for rainbow trout fed diets with inclusion of different soybean products (Enriquez et al., 2015; Aguilón et al., 2017; Segura et al., 2021).

Use of soybean meal has been reported to cause upregulation of immune-related genes and resulting in inflammation and enteritis in salmonids (Krogdahl et al., 2010; Tsai et al., 2023). The expression of five interleukins was assessed, three proinflammatory (the *il-1 β* , *il-8*, and *il-21*) and two anti-inflammatories (*il-4* and *il-10*). Interleukins are a group of cytokines which are involved in the regulation of several immune responses (Secombes et al., 2011; Sakai et al., 2021).

The IL-1 β and IL-8 play an important role in the inflammatory response (Seibel et al., 2022) and both enzymes are complementary by stimulating the T cells, increasing the phagocytic activity, antibody production (IL-1 β) and inducing the cell migration (IL-8). The expression of *il-1 β* induces the upregulation of *il-8* (Secombes et al., 2001) and usually, their expression shows similar patterns (Vélez-Calabria et al., 2021). However, during this experiment the expression of *il-8* decreased as the *P. acidilactici* inclusion increased. In fish, the upregulation of the *il-1 β* has been reported during bacterial infection (Sakai et al., 2021), use of dietary prebiotic and probiotic (Sealey et al., 2009; Standen et al., 2013; Al-Hisnawi et al., 2018; Jaramillo-Torres et al., 2019) and when fed soybean meal as main protein source (Torrecillas et al., 2018). Upregulation of *il-1 β* in fingerlings fed diet *Pa-20* seems to be related to the concentration of *P. acidilactici*, rather than inclusion of soybean meal as protein source. Previous reports indicate that increased immune responses were observed when *P. acidilactici* was added in 4×10^6 CFU/g diet for zebrafish (Arani et al.,

2018) and 2.1×10^6 CFU/g diet for rainbow trout (Al-Hisnawi et al., 2019), inclusions that are similar to the concentration on diet Pa-20. Regarding the expression of *il-21*, it shows a similar trend to *il-1 β* with upregulation of the group Pa20 and downregulation of Control, Pa0.2 and Pa2. IL-21 is a novel cytokine that in preliminary studies with fish shows to be involved in inflammatory response to bacterial (Li et al., 2022) and viral (Yu et al., 2020) infections. It seems that upregulation of *il-21* is associated with the inclusion of *P. acidilactici* at the level of 20 g/kg, as observed previously for zebrafish (Arani et al., 2018) and rainbow trout (Al-Hisnawi et al., 2019).

Regarding the anti-inflammatory interleukins, *il-4* and *il-10* expressions were upregulated with the inclusion of *P. acidilactici*, regardless of the concentration in diets. IL-4 is involved in the responses that increase mucus production, tissue repair, regulating the inflammatory process and inducing the upregulation of *il-10* (Zhang et al., 2023). On the other hand, IL-10 has been reported to possess a more anti-inflammatory role than IL-4, as it can suppress various immune response (Bottiglione et al., 2020). Additionally, it has been reported that IL-10 downregulates the *il-1 β* in Atlantic salmon and rainbow trout (Sequeda et al., 2020). The observed expressions of *il-4* and *il-10* indicate that the inclusion of *P. acidilactici* helps in reducing the inflammation caused by soybean meal.

5. CONCLUSION

Our results show that after 90-days of feeding, *P. acidilactici* helps to reduce the intestinal inflammation caused by the inclusion of 400 g/kg of soybean meal in rainbow trout fingerlings. Considering the growth performance and the expression of the different interleukins (particularly the IL-4 and IL-10), the concentration of 20 g/kg seems to be adequate for using with high levels of soybean meal. Though, it is necessary to feed the probiotic for longer periods to see how the probiotic maintains the anti-inflammatory effect throughout longer periods of time and analyze other genes which may help us to understand the mechanism of *P. acidilactici* in the intestine of rainbow trout.

REFERENCIAS

Al-Hisnawi A., Rodiles, A., Rwaling, M.D., Castex, M., Waines, P., Gioacchini, G., Carnevali, O., & Merrifield, D.L. (2019). Dietary probiotic *Pedococcus acidilactici* MA18/5M modulates the intestinal microbiota and stimulates intestinal immunity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of the World Aquaculture Society*, 50, 1133-1151.

Aguillón H.O.E., Hernández, H.L.H., Shimada, A., & Garduño, M. (2017). Effects of diets with whole plant-origin proteins added with different ratios of taurine:methionine on the growth, macrophage activity and antioxidant capacity of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fingerlings. *Veterinary and Animal Science*, 2, 4-9. DOI: 10.1016/j.was.2017.04.002

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (1990). *Official methods of analysis*. 15th ed. Association of Analytical Chemistry, Virginia.
- Arani M.M., Salati, A.P., Safari, O., & Keyvanshokoo, S. (2019). Dietary supplementation effects of *Pediococcus acidilactici* as probiotic on growth performance, digestive enzyme activities and immunity response in zebrafish (*Danio rerio*). *Aquaculture Nutrition*, 25, 854-861. DOI: 10.1111/anu.12904
- Arani M.M., Salati, A.P., Keyvanshokoo, S., & Safari, O. (2021). The effects of *Pediococcus acidilactici* on mucosal immune responses, growth, and reproductive performance in zebrafish (*Danio rerio*). *Fish Physiology and Biochemistry*, 47, 153-162. DOI: 10.1007/s10695-020-00903-8
- Blaufuss P.C., Bledsoe, J.W., Gaylord, T.G., Sealy, W.M., Overturf, K.E., & Powell, M.S. (2020). Selection on a plant-based diet reveals change in oral tolerance, microbiota and growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) when fed a high soy diet. *Aquaculture*, 525, 735287. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2020.735287
- Blight, E.G., & Dyer, W.J. 1959. A rapid meths of total lipids extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37, 911-917. DOI:10.1139/o59-099
- Bottiglione F., Dee, C.T., Lea, R., Zeef, L.A.H., Badrock, A.P., Wane, M., Bugeon, L., Dallma ,M.J., Allen, J.E., & Hurlstone F.L. (2020). Zebrafish IL-4-like cytokines and IL-10 suppress inflammation but only IL-10 is essential for gill homeostasis. *Journal of Immunology*, 205, 994-1008. DOI: 10.4049/jimmunol.200372
- Callet T., F. Médale, L. Larroquet, A. Surget, P. Aguirre, T. Kerneis, L. Labbé, E. Quillet, I. Geurden, S. Skiba-Cassy, and M. Dupont-Nivet. 2017. Successful selection of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) on their ability to grow with a diet completely devoid of fishmeal and fish oil, and correlated changes in nutritional traits. *PLoS ONE* 12: e186705. DOI: 10.1371/journal.pone.0186705
- Cruz, C.C.A., Hernández, H.L.H., Fernández, A.M.A., Ramírez, P.T., & Angeles, L.O. (2011). Effects of diets with soybean meal on the growth, digestibility, phosphorus and nitrogen excretion of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Hidrobiológica*, 21, 118-125.
- Enriquez, R.M.L., Ramírez, E.A., Hernández H.L.H., & Fernández, A.M.A. (2015). Effect of the substitution of fish oil with a mixture of plant-based oils in diets of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) fingerlings on growth, phosphorus and nitrogen excretion. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, IJA_67.2015.1217, 1-9. DOI:10.46989/001c.20681
- Gatlin, M.D., Barrows, F.T., Brown, P., Dabrowski, K., Gaylord, T.G., Hardy, R.W., Herman, E., Hu, G., Krogdahl, Å., Nelson, R., Overturf, K., Rust, M., Sealey, W., Skonberg, D., Souza, E.J., Stone, D., Wilson, R., & Wurtele, E. (2007). Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aquaculture Research*, 38, 551-579.
- Hardy, R.W. 2010. Utilization of plant protein in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal. *Aquaculture Research* 41: 770-776. DOI: 10.1111/j.1365-2019.2009.02349.x
- Harper, G.M., Monfort, M., Saoud, I.M., Emery, M.J., Mustafa, S., Rawling, M.D., Eynon, B., Davies, S.J., & Merrifield, D.L. (2011). An ex vivo approach to studying the interactions of *Pediococcus acidilactici* and *Vibrio (Listonella) anguillarum* in the anterior intestine of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture Research and Development*, S1, 004. DOI: 10.4172/2155-9546.S1-004.
- Jaramillo-Torres, A., Rawling, M.D., Rodiles, A., Mikalsen, H.E., Johansen, L.H., Tinsley, J., Forberg, T., Aasum, E., Castex, M., & Merrifield, D.L. (2019). Influence of dietary supplementation of probiotic *Pediococcus aceidilactici* MA18/5M during the transition from freshwater to seawater on intestinal health and microbiota of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Frontiers in Microbiology*, 10, 2243. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02243.

Krogdahl, Å., Penn, M., Thorsen, J., Refstie, S., & Bakke, A.M. (2010). Important antinutrients in plant feedstuffs for aquaculture: an update on recent finding regarding responses in salmonids. *Aquaculture Research*, 41, 333-344. DOI: 10.1111/j.1365-2019.2009.0242.26x

Laining, A., Traifalgar, R.F., Thu, M., Komilus, C.F., Kader M.A., Koshio, S., Ishikawa, M., & Yokoyama, S. (2010). Influence of dietary phytic acid on growth, feed intake, and nutrient utilization in juveniles Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 41, 746-755. DOI: 10.1111/j.1749-7345.2010.00419.x.

Li, D, Cui, Z., Zhao, F., Zhu, X., Tan, A., Deng, Y., Lai, Y., & Huang, Z. (2022). Characterization of snakehead (*Channa argus*) interleukin-21: involvement in immune defense against two pathogenic bacteria, in leukocyte proliferation, and in activation of JAK-STAT signaling pathway. *Fish and Shellfish Immunology*, 123, 207-217. DOI: 10.1016/j.fsi.2022.03.006.

Livak, K.J., & Schmittgen, T.D. (2001). Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method. *Methods*, 25, 402-408. DOI: 10.1006/meth.2001.1262.

Merrifield, D. L., Dimitroglou, A., Foey, A., Davis, S.J., Baker, R.T.M., Bøgwald, J., Castex, M., & Ringø, E. (2010). The current status and future focus of probiotic and prebiotic applications for salmonids. *Aquaculture*, 302, 1-18. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2010.02.007

Merrifield, D.L., Bradley, G., Harper, G.M., Baker, R.T.P., Munn, C.B., & Davies, S.J. (2011). Assessment of the effects of vegetative and lyophilized *Pediococcus acidilactici* on growth, fed utilization, intestinal colonization and health parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum). *Aquaculture Nutrition*, 17, 73-79. DOI: 10.1111/j.1365-2095.2009.00712.x

Sakai, M., Hikima, J., & Kono, T.. 2021. Fish cytokines: current research and applications. *Fisheries Science*, 87, 1-9. DOI: 10.1007/s12562-020-01-01476-4.

Sánchez, Á.D., Arvizu, E., Hernández, H.L.H., Fernández, A.M.A., & Angeles, L.O. (2015). Addition of yeast and/or phytase to diets with soybean meal as main protein source: effects on growth, P excretion and lysozyme activity in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 15: 215-222. DOI: 10.4194/1303-2712-v15_2_03.

Sealey, W.M. Barrows, F.T., Smith, C.E., Overturf, K., & LaPatra S.E. (2009). Soybean meal level and probiotics in first feeding fry diets alter the ability of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* to utilize high levels of soybean meal during growth-out. *Aquaculture*, 293, 195-203. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2009.04.013.

Secombes, C.J., Wang, T., Hong, S., Peddie, S., Crampe, M., Laing, K.J., Cunningham, C., & Zou, J. (2001). Cytokines and innate immunity of fish. *Developmental and Comparative Immunology*, 25, 713-723. DOI: 10.1016/s0145-305x(01)00032-5.

Secombes C.J., Wang, T., & Bird, S. (2011). The interleukins of fish. *Developmental and Comparative Immunology*, 35, 1336-1345. DOI: 10.1016/j.dci.2011.05.001

Seibel, H., Krassilnikova, K., Fichtner-Grabowski, F.T., Rebl, A., Schulz, C., & Hornburg, S.C. (2022). Interactions of plant-based feeding and handling stress on the expression of selected immune markers in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Research*, 53, 4304-4315. DOI: 10.1111/are.15928.

Segura-Campos, J.M., Trujano-Rodríguez, A.A., Hernández-Hernández, L.H., Macedo-Garzón, B. & Cardenas-Reygadas, R. (2021). Inclusion of fructooligosaccharides and mannanoligosaccharides in plant-protein based diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fingerlings and its effects on the growth and blood serum biochemistry. *Hidrobiológica*, 31, 153-159. DOI: 10.24275/uam/izt/dcbshidro72021v31n27Segura

Sequeida, A., Castillo, A., Cordero, N., Wong, V., Montero, R., Vergara, C., Valenzuela, B., Vargas, D., Valdés, N., Morales, J., Tello, M., Sandino, A.M., Maisey, K., & Imarai, M. (2020). The Atlantic salmon interleukin 4/13 receptor family: structure, tissue distribution and modulation of gene expression. *Fish and Shellfish Immunology*, 98, 773-787. DOI: 10.1016/j.fsi.2019.11.030.

Standen, B.T., Rawling, M.D., Davies, S.J., Castex, M., Foey, A., Gioacchini, G., Carnevali, O., & Merrifield, D.L. (2013). Probiotic *Pediococcus acidilactici* modulates both localized intestinal and peripheral-immunity in tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish and Shellfish Immunology*, 35, 1097-1104. DOI: 10.1016/j.fsi.2013.07.018.

Tacon, A.G.J., & Metian, M. (2008). Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospect. *Aquaculture*, 285, 146-158. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2008.08.015

Torrecillas, S., Rivero-Ramírez, F., Izquierdo, M.S., Caballero, M.J., Makol, A., Suarez-Bregua, P., Fernández-Montero, A., Rotllant, J., & Montero, D. (2018). Feeding European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles with functional symbiotic additive (mannan oligosaccharides and *Pediococcus acidilactici*): an effective toll to reduce low fishmeal and fish oil gut health effects? *Fish and Shellfish Immunology*, 81, 10-20. DOI: 10.1016/j.fsi.2018.07.007.

Tsai T.Y., Hernandez, H.L.H., Gaylord, T.G., & Powell, M.S. (2023). Effects of dietary soybean meal inclusion on calcium-binding protein expression and inflammatory gene markers in liver and intestine of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture Reports*, 30, 101624. DOI: 10.1016/j.aqrep.2023.101624

Vélez-Calabria, G., Sánchez, D., Jover-Cerdá, M., Martínez S., & Tomés-Vidal, A. (2021). Successful inclusion of high vegetal protein sources in feed for rainbow trout without decrement in intestinal health. *Animals*, 11, 3577. DOI: 10.3390/ani11123577

Yu, C., Zheng, P., Li, X., & Sun, L. (2020). Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* interleukin 21 induces inflammatory response and plays a vital role in the immune defense against bacterial pathogen. *Fish and Shellfish Immunology*, 98, 364-373. DOI: 10.1016/j.fsi.2020.01.043.

Zhang, J., Yu, M., Wang, J., Longshaw, M., Song, K., Wang, L., Li, X., Zhang, C., & Lu, K. (2023). Methanotroph (*Methylococcus camulatus*, Bath) bacteria meal alleviates soybean meal-induced enteritis in spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) by modulating immune responses and the intestinal flora. *Aquaculture* 575: 739795. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2023.7

CAPÍTULO 2

INTRASPECIFIC DENSITY EFFECT ON GROWTH OF *Marphysa* “SP”. JUVENILES¹

Data de submissão: 12/06/2025

Data de aceite: 27/06/2025

João Pedro Monteiro Ferreira Garcês

IPMA – Instituto Português do
Mar e da Atmosfera

(Portuguese Institute for the
Ocean and Atmosphere)

Centro de Investigação

Pesqueira do Sul (CRIPSul)

Avenida 5 de Outubro, 8700-305

Olhão, Portugal

(Corresponding author)

<https://orcid.org/0000-0002-1684-4422>

Pedro Marques Pousão Ferreira

IPMA – Instituto Português do

Mar e da Atmosfera

(Portuguese Institute for the
Ocean and Atmosphere)

Estação de Piscicultura de Olhão

(EPPO Aquaculture Research Station)

Av. Parque Natural da Ria Formosa s/n

8700-194 Olhão, Portugal

<https://orcid.org/0000-0001-6746-764X>

ABSTRACT: There is growing demand for the territorial tube-building genus *Marphysa* (Eunicidae: Polychaete), commonly known in

Portugal as “goose”, for use as fishing bait, and it is being harvested all around the world for that purpose. Effects of intraspecific density on juvenile growth were studied over a four-month period in laboratory facilities. Three polychaete densities (low, 50 worms; medium, 150 worms; and high, 250 worms) were used in a 0.25 m² aquarium containing sandy sediment and recirculating water. Total length, dry weight and number of segments were recorded for 60% of the initial population. All polychaetes were also counted to determine mortality rate and territorial behaviour through the existence of body lesions and broken and regenerating posterior segments. The results obtained in this study showed that density had a significant effect ($p<0.001$) on growth rates in any of the densities studied and that growth was significantly higher at lower densities ($p<0.001$). For all density levels, estimated daily growth was higher in the first month, decreasing progressively over time. The high aggressiveness and territorial behaviour of *Marphysa* “sp.” juveniles, well evidenced by the highest mortality (35%) under high density and by the presence of worms with lesions under low density (30%) observed in the first month, suggests that territoriality is probably the main factor involved in the organization and spatial arrangements of individuals within a population. *Marphysa* juveniles probably compete for burrow space. The results reveal that *Marphysa* juveniles have a very territorial and aggressive behaviour that should be considered if the species is used for

¹ SCI. MAR. 85(2), June 2021, 137-144. ISSN-L 0214-8358
<https://doi.org/10.3989/scimar.05078.012>

aquaculture production. Additional studies are required to determine the density effects for different developmental stages.

KEYWORDS: aquaculture; density; growth; *Marphysa*; polychaetes.

EFEITO DA DENSIDADE INTRAESPECÍFICA NO CRESCIMENTO DE *Marphysa* “SP”. JUVENIS

RESUMO: O poliqueta *Marphysa* “sp.” (Eunicidae), vulgarmente conhecido em Portugal por “ganso”, é amplamente utilizado em todo o mundo como isco para a pesca desportiva e profissional. Os efeitos da densidade intraespecífica no crescimento juvenil foram estudados em laboratório durante um período de quatro meses. Foram utilizadas três densidades: baixa (50 poliquetas), média (150 poliquetas) e alta (250 poliquetas) em aquários de 0,25 m², com areia e água recirculada. O comprimento total (cm), o peso seco (g) e o número de segmentos foram registados em 60% da população inicial. Foram também contados todos os poliquetas para determinar a taxa de mortalidade e o comportamento territorial através da presença de lesões corporais, segmentos posteriores ausentes ou em regeneração. Os resultados obtidos mostraram que o crescimento foi significativamente maior nas densidades mais baixas ($p < 0,001$). Para todos os níveis de densidade, o crescimento diário estimado foi maior no primeiro mês, diminuindo progressivamente ao longo do tempo. A elevada agressividade e o comportamento territorial dos juvenis de *Marphysa* “sp”, claramente evidenciados no primeiro mês, pela maior mortalidade (35%) verificada em alta densidade e pela presença de indivíduos com lesões em baixa densidade (30%), sugerem que a territorialidade é provavelmente o principal factor regulador da organização e distribuição espacial dos indivíduos dentro de uma população. Em conclusão, os resultados obtidos revelam que os juvenis de *Marphysa* “sp.” têm um comportamento muito territorial e agressivo, o que deve ser considerado se se pretender utilizar a espécie para produção aquícola. São necessários estudos adicionais para determinar os efeitos da densidade em diferentes fases de desenvolvimento.

PALAVRAS CHAVE: aquicultura; densidade; crescimento; *Marphysa*; poliquetas.

1. INTRODUCTION

The iteroparous and long-lived polychaete *Marphysa* “sp.” used in this study, and originally described from the south coast of England, has been recorded from many localities around the world, often without an exhaustive description or deposition of voucher material (Hutchings and Karageorgopoulos 2003). This genus has a global distribution and is of considerable value in the bait industry worldwide. Recently, there has been some debate on whether this genus may in fact encompass a series of cryptic species from different geographical regions that are morphologically difficult to distinguish (Lewis and Karageorgopoulos 2008, Asmaa et al. 2018, Lavesque et al. 2019). Therefore, we prefer to use the genus until we have evidence that this species is *Marphysa sanguinea* (Montagu 1813).

Competition for space and food are important structuring agents of populations of sediment-dwelling species and are therefore key factors in species distribution and community organization (Rosenberg et al. 1997). In areas where food is abundant, space can become a factor limiting population expansion. Several studies of infaunal marine soft-bottom species showed that individual growth, larval recruitment and survivorship are negatively affected by an increase in density (Reise et al. 2001, Safarik et al. 2006 and references therein). In the laboratory it has been shown that an increase in population density is usually associated with a decrease in fertility (Zajac 1996) and in territorial and food competition (Scaps et al. 1998, Grelon et al. 2006). However, intraspecific relations between benthic individuals, particularly among polychaetes, are more complex, with several factors interacting simultaneously. According to Lemieux et al. (1997), the ability to exploit a habitat depends on the ability to defend a burrow, and this ability is related to aerobic capacity. In addition to the intrinsic interest in annelid polychaetes as ubiquitous and highly abundant members of all marine benthic ecosystems, there is a growing demand for these organisms as fishing bait, so they are being commercially exploited all around the world (Watson et al. 2016, Cole et al. 2018), including Europe (Gambi et al. 1994, Olive 1999, Lavesque et al. 2017). They have also been introduced in integrated polycultures to help manage organic matter and waste produced by bivalves and fish (Batista et al. 2003). They are a natural source of proteins and omega-3 fatty acids, so they can be used as a nutritional resource and maturation diet in crustacean and fish aquaculture (Noda et al. 1994, Watson et al. 2016, Glasby et al. 2019). Therefore, in addition to the impacts of traditional bait harvesting (Carvalho et al. 2013), new mechanized methods of collection are being developed to increase efficiency, productivity and revenue (Beukema 1995, Birchenough 2013). The traditional bait digging exploitation continues to occur, presenting an ill-defined boundary between anglers collecting strictly for their own use and those collecting for profit, who represent a form of parallel economy in conflict with a controlled, sustainable use (Olive 1993; Cabral et al. 2019, Pombo et al. 2018).

1.1. POTENTIAL USES

Marphysa “sp.”, commonly known by the name of “goose”, is one of the most appreciated bait species among those collected and commercialized in Portugal because of its high resistance in the hook and its reputed ability to attract valuable fish species such as the seabreams *Sparus aurata* and *Diplodus sargus*. Though it is difficult to value this resource because the sales are not declared (Castro 1993), harvesting is one of the most important socio-economic resources for local fishermen, and sales of €500000 per year are estimated (unpublished data) (Garcês and Pereira 2010).

The long-term exploitation of this genus requires a good knowledge of the biological and ecological characteristics of natural populations in order to develop rearing techniques for intensive production with the aim of increasing supply, reducing harvesting and fostering sustainable use.

With this purpose in mind, a small-scale experiment was conducted in order to address the way in which intraspecific density can influence somatic growth in juveniles of *Marphysa* “sp.” when food and sediment are not limiting factors. These effects were studied over a four-month period in laboratory facilities.

Further development of polychaete culture is considered of economic importance beyond that associated with the bait supply industry which acted as the initial catalyst for this research.

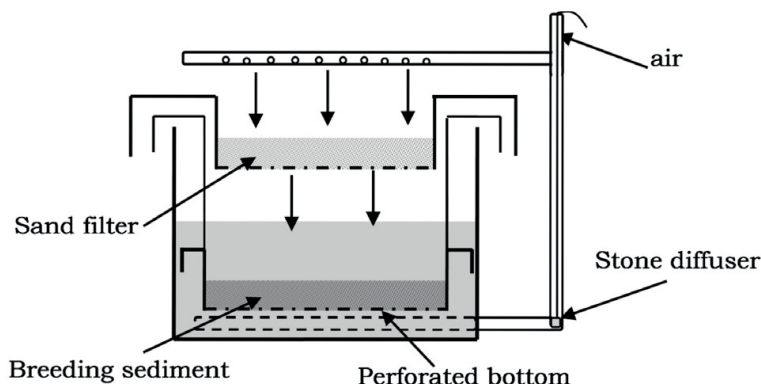
2. MATERIALS AND METHODS

A four-month on-site controlled experiment was conducted with *Marphysa* “sp.” juveniles reared in the laboratory (25 to 30 setigerous segments corresponding to a total length of 0.7 ± 0.05 cm to 0.9 ± 0.08 cm, respectively). The juveniles were placed in glass aquaria (0.5 x 0.5 x 0.5 m) (Fig. 1). Each aquarium was filled with a 6 cm layer of beach sand (>95% fine grain <50 μ m). The sand was previously screened to remove macroalgae and any associated macrofauna, sun dried and then rinsed several times with freshwater and seawater alternately. It was further heated and sterilized in an autoclave.

Before being added to aquaria that were randomly placed in the laboratory to reduce any position effects, the water was filtered through a biological filter and a cartridge series and maintained under constant oxygenation. Each aquarium was connected to a recirculation system (RAS) to allow continuous seawater flow and continuous aeration (see Figure 1).

Three different densities were used and replicated three times: high density (250 juveniles corresponding to 1000 juveniles/m²), medium density (150 juveniles corresponding to 500 juveniles/m²) and low density (50 juveniles corresponding to 200 juveniles/m²). The worms were placed inside each aquarium in a suspended tray (see Fig. 1) fitted with a perforated bottom. The water was circulated by the action of an air stone placed inside the circulation tube. The biological filter, composed of beach sand of different grain sizes, was also placed inside a tray at the top of the structure.

Figure. 1: - Schematic aquarium design used in the assays.



During the first 48 h of acclimatization to the laboratory conditions, the juvenile worms were able to settle (construct and establish burrows). The glass walls of the aquariums allowed the polychaetes inside them to be observed regarding their feeding and territorial behaviour. Water temperature, salinity, dissolved oxygen, pH, ammonium (NH_4^+) and nitrites (NO_2^-) were measured three times per week: temperature, dissolved oxygen and pH were measured by a multiparameter Hanna instruments model HI9829 water quality meter, salinity by a Hanna instruments HI83306 refractometer and ammonia and nitrites by two Hanna instruments kits, HI93700 and HI93708, respectively. In each aquarium, a mixture of crushed cockles (20%), mussels (60%) and shrimp (20%) were provided daily, fresh and ad libitum, five times a week, representing an amount equivalent to 3% wet body weight. They were fed daily to avoid cannibalism. Excess food was removed three hours after being supplied. The diet was adjusted to account for increases in mean polychaete weight through time. Growth data were collected monthly for a sub-sample of 60% of the initial polychaete numbers for each density and aquarium after the beginning of the study. Morphological variables were only considered for whole individuals that did showed no signs of regeneration, broken segments or injuries. All polychaetes were also counted to determine mortality rate, and confrontation and territorial behaviour was observed through the existence of body lesions and broken and regenerating posterior segments.

In this work, total length (TL) and total dry weight (TDW) (Fig. 2) were adopted as biometric measures according to the following expressions (Castro 1993):

$$(1) \quad \text{TL} = 3.9303 \times \text{WBS}^{1.3307} \quad r=0.9770; n=192$$

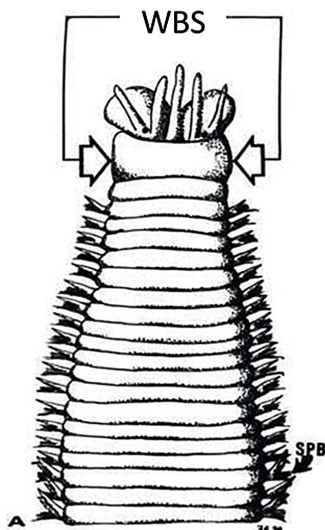
$$(2) \quad \text{TDW} = 0.0026 \times \text{WBS}^{3.6894} \quad r=0.9845; n=356$$

where WBS (width of buccal segment) = LSB (put on legend).

Length was always determined from the number of setigers formed (SPB in Figure 2). Segments were counted under a stereomicroscope equipped with a micrometric ocular at 20x magnification. The linear measurements of WBS obtained were taken under a stereomicroscope equipped with a micrometric ocular at 2x magnification.

The dimensions obtained were processed by the Qwin Lite 2.4 image-processing software system (Leica Microsystems Imaging Acquisition). Statistical analysis was performed using SPSS software (version 18; SPSS inc, Chicago, IL). The relationships between density and time and polychaete growth and survival were analysed# by two-factor ANOVA followed by a Tukey test when significant differences were found.

Figure. 2: Dorsal view of the anterior region of *Marphysa* sp., adapted from Garcês and Pereira (2010). B WBS = Width of buccal segment.



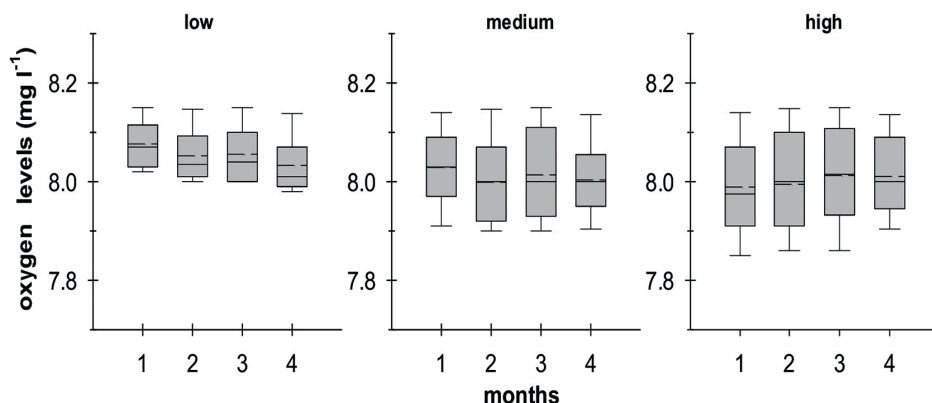
3. RESULTS

3.1. WATER PARAMETERS

During the study, the physico-chemical water parameters remained approximately constant. There were no significant differences between replicates ($p \geq 0.05$) for the parameters under study. However, over the 4 months gradual and slight variations in water temperature (19°C-25°C), salinity (30-33), pH (7.6-8.1) ammonium (0.4-0.0) and nitrites (0.2-0.03) were nonetheless observed. The slight increase in ammonia and nitrite values during the experiment may be correlated with the confrontations and the associated mortality, but they did not reach high values that could have influenced this mortality. The control of these parameters reveals a perfect functioning of the biological filter. There was

a higher dispersion value in dissolved oxygen concentrations according to the density, which means an increased consumption by worms. However, there were no significant differences ($p \geq 0.05$) between the replicates or in each density over time (Figure 3).

Figure 3: Dissolved oxygen concentrations (ppm) during the study at the three densities tested (low, medium and high).



3.2. FEEDING BEHAVIOUR

During this study, juveniles of *Marphysa* “sp.” were observed to capture and ingest food particles on the sediment surface using their jaws, which are located ventrally as the worm moves over the substratum. The feed intake was observed to vary with density. At low density, the food particles were almost immediately consumed by the worms, which sometimes emerged completely from the gallery, getting fully exposed in the sediment surface. At medium and high densities, feeding was mainly at night, and the worms never left the gallery, collecting food in a circular area and fleeing immediately into the gallery at the slightest sign of danger. At high density, the food was not entirely consumed during the first two months. However, it was not possible to determine the frequency with which searching activities resulted in particle consumption. Worms were observed seizing particles with their forceps jaws on many occasions, on both the substratum and over their tube or over the tube of a neighbour without confrontation.

3.3. SOMATIC GROWTH

No significant differences were found in growth between replicates of each treatment during the four months of the study, although differences tended to be greater between replicates in the high-density treatment. A two-factor ANOVA showed significant density and time effects ($p < 0.001$) and a significant interaction between density and time ($p > 0.001$) for all the growth variables in every month.

Means of total length, weight and number of segments were inversely related to density. In all treatments, juveniles grew steadily during the four months of the study (Figure 4), but a comparison of the monthly average increase shows that the three parameters under study evolved differently for each density treatment.

At low and medium density levels, the estimated monthly increase in the number of segments was higher in the first month and decreased progressively over time. Under high density, however, there was a progressive increase in the number of segments from the second month. Only increase in weight was, in general, continuous at all densities.

After four months, at the lowest density the polychaetes formed 61.5 ± 4.2 segments, gained 0.1 ± 0.01 g in dry weight and grew 4 ± 0.2 cm, at average density they formed 51.8 ± 4 segments (0.08 ± 0.008 g, 3 ± 0.2 cm) and at high-density they formed 43 ± 6 segments (0.05 ± 0.01 g, 2.4 ± 0.3 cm) (see Fig. 4). It is noteworthy that at low density a significant decrease in the three parameters was observed in the last month ($p > 0.0001$).

Figure: 4. - Monthly Growth of *Marphysa* "sp." at each density level (low, medium and high). T_0 – beginning of study; T_1 – period at month 1 and so on (T_2 , T_3 and T_4); monthly growth ($T_0 - T_{n-1}$); specific growth rate ($T_0 - T_{n-1}$)/30 days.

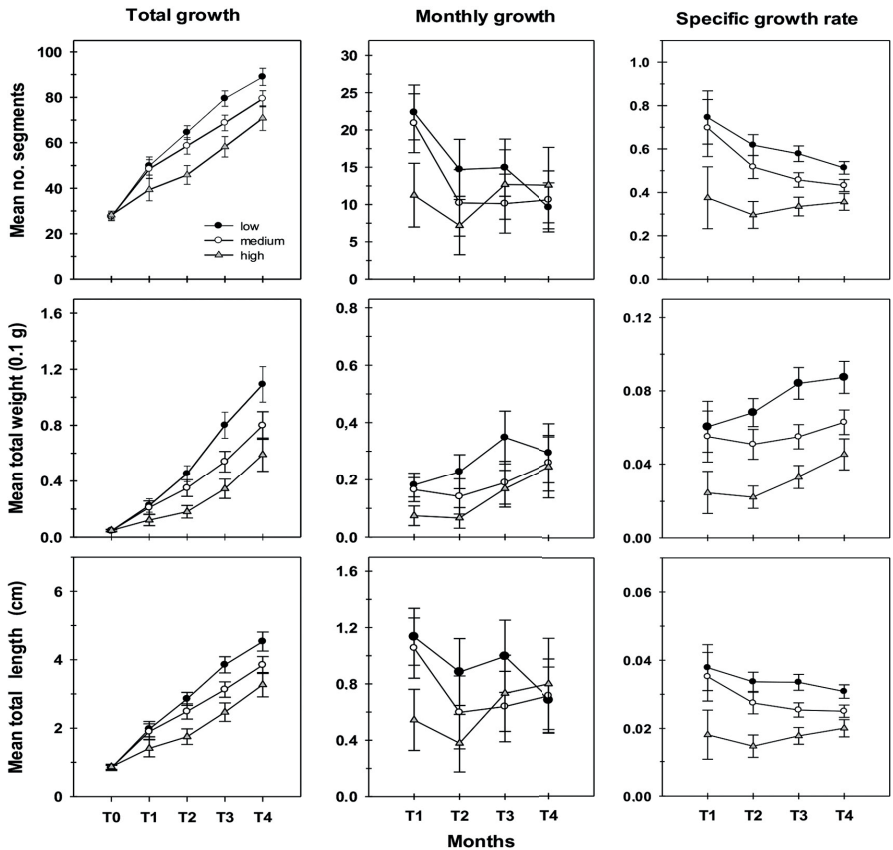
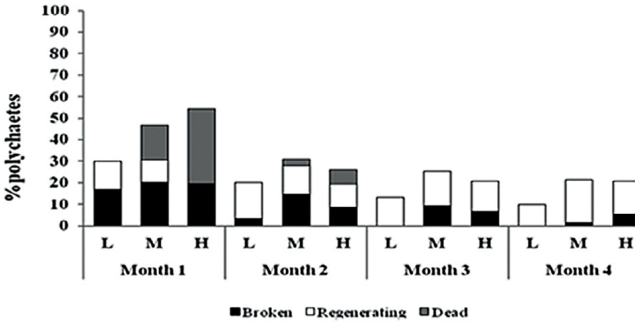


Figure 5. - Monthly percentage occurrence of *Marphysa* “sp.” Mortality and broken and regenerating posterior segments observed at each density level.

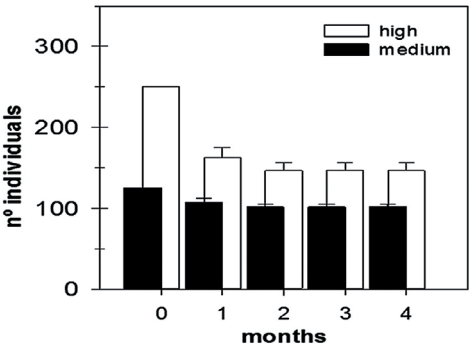


In this study, this high aggressiveness and territorial behaviour of *Marphysa* “sp.” is well evidenced by the higher mortality (35%) and greater incidence of broken and regenerating posterior segments (19.3%) observed under high density in the first month and by the presence of worms with lesions under low density (30%) (Fig. 5).

Although the incidence of broken posterior segments was overall slightly higher (16%) at medium density, mortality was much lower (15%). The sharp decline both in mortality and in the incidence of broken posterior segments that occurred in the following months reveals that the worms tended towards an equilibrium density. However, confrontation never ceased, as shown by 5.2% and 1.3% of individuals with lesions in high and medium densities respectively in the fourth month of the study (Fig. 5). Average estimated mortality after four months was 44.9%, 18.9%, and 0% at high, medium and low-density levels, respectively.

Despite this very high mortality, the average evolution of the existing population (Figure 6) shows that significant differences in the number of individuals ($p>0.001$) continued to exist between the high and medium densities throughout the study, though it did not call into question the existence of three densities.

Figure 6. - *Marphysa* “sp.” population evolution at high and medium densities for four months.



The existence of confrontations in the low-density tanks (with 16.7% and 13.3% of broken and regenerating individuals, respectively) confirms the high aggressiveness and territoriality evidenced by this species and suggests that, up to a certain point, the density can be higher than the optimum without necessarily resulting in death.

4. DISCUSSION

4.1. WATER PARAMETERS

Most infaunal animals irrigate their burrows with oxygen-rich overlying water. They are active 20% to 50% of the time, alternating between active and quiescent periods in a rhythmic fashion, according to species (Garcês and Costa 2009, Galaktionov et al. 2004, Kristensen 2001). *Marphysa* “sp.” dwells in L-shaped burrows and display vigorous bio-irrigation activity by pumping oxygenated water via peristaltic motions. According to Webber 1978, this genus has a high affinity to oxygen and high sensitivity to changes in pH, suggesting a permanent life in galleries subject to low oxygen concentrations.

According to (Lemieux et al. 1997), the ability to explore a site largely depends on the ability to defend the gallery with a minimum of injuries. These authors have found a significant correlation between aerobic metabolism and the duration of the fight in *Nereis virens*. They argue that short-term confrontations are advantageous because they increase survival while still limiting the mobilization of anaerobic metabolism. On the other hand, high aerobic activity may be related to high metabolic rates, so the benefit of fights may be somewhat offset by a high metabolic costs for the antagonists, decreasing the energy available for growth and reproduction.

4.2. FEEDING BEHAVIOUR

Effects of increased density were also observed to lead to modifications in burrow shape. The absence of connections between the burrows as the density increased suggests that territoriality is certainly the main factor involved. A preference for the centre of the aquarium was observed during this study, i.e. colonization was made from the centre to the periphery of the aquaria at all densities. Scaps et al. (1998), in a study of *Perinereis cultrifera*, found that the area around the burrow opening is not defended and therefore does not constitute a territory, and they postulate that *P. cultrifera* probably competes for burrow space but may share food#. By contrast, Levin (1982) and Taghon (1992) showed that spacing between neighbours in Spionid species can be affected by the particle supply mechanism and the source of food particles. In *Paralvinella sulfincola*, a polychaete worm

living near deep-sea hydrothermal vents, Grelon et al. (2006) showed that the size of the territory and the control exerted over intruders depends on worm-density and individual body weight, reinforcing the importance of size and aggressiveness in the defence of the foraging area. The method of feeding may also partly explain the observed behaviour. The use of sand and the type of diet, which was deposited directly onto the substrate surface, forced the worms to use their jaws to capture the food particles, therefore exposing their anterior region.

4.3. SOMATIC GROWTH

The results obtained suggest that confrontation may have significantly ($p < 0.001$) reduced growth, particularly at medium and high densities and in the first month (Figs 4, 5). The rising growth, which occurred at high density (Fig. 4) in the last two months, can be explained by the sharply declining number of individuals and therefore a decrease in confrontation with the concomitant establishment of undisputed territories. The same pattern was observed for the increased frequency of individuals injured, regenerated and killed. The negative density-dependent effects on growth of *Marphysa* “sp.” juveniles are similar to those reported for several other polychaete species (Grelon et al. 2006, Safarik 2006, Nesto et al. 2012). The negative density-dependent effects on growth of juvenile and late juvenile *M. sanguinea* obtained by Parandavar et al. (2015) are similar to those obtained in our study. According to these authors, *Marphysa sanguinea* juveniles possess the ability to grow better at low density, and survival is negatively influenced by high rearing density. In the present study, survival was negatively influenced by high rearing density, as has also been already reported for *N. arenaceodentata* (Dillon et al., 1993), *D. aciculata* (Safarik et al. 2006) and *Hediste diversicolor* (Nesto et al. 2012). The decreasing survival percentages are likely to be related to the increasing intraspecific competition. Rearing density—related patterns in growth and mortality provide evidence for negative density-dependent interactions with neighbouring worms. According to Safarik et al. (2006), in *Diopatra aciculata* the negative effects of density on growth are due to intraspecific interactions, including competition for resources other than food. Territoriality can be fundamental for the survival of this species because the individual territory serves primarily for defence and refuge from predators, but also appears to be the primary foraging ground.

The existence of confrontations in the low-density tanks (with 16.7% and 13.3% of broken and regenerating individuals, respectively) confirms the high aggressiveness and territoriality evidenced by this species and suggests that, up to a certain point, the density

can be higher than the optimum without necessarily resulting in death. However, in this study the worms were limited to a rigid physical space, and as they grow, they increase not only the body volume but also the territorial surface, obviously increasing the likelihood for encounters. Competition for space has also been shown for *Neanthes arenaceodentata*, which exhibit aggressive behaviour at high density, as demonstrated by an increase in the frequency of polychaetes regenerating posterior segments (Bridges et al. 1996).

Studies undertaken by (Esnault et al. 1990, Scaps et al. 1993) showed a similar reduction in growth, biomass and survival at high densities, even in the presence of abundant food. Stress associated with frequent handling of *Hediste diversicolor* and changes in water temperature and salinity have also been found to induce negative effects on growth (Scaps et al. 1993, Garcês and Pereira 2010). The decreasing survival percentages are likely to be related to the increasing intraspecific competition. Rearing density–related patterns in growth and mortality provide evidence for negative density-dependent interactions with neighbouring worms.

5. CONCLUSIONS

The results have shown that space occupation by *Marphysa* “sp.” juveniles depends primarily on aggressive interaction. However, these observations may not apply to the entire life cycle of the species, which is known to be under the control of a greater range and complexity of movements.

The feeding method may also partly explain the observed behaviour. The use of sand and the type of diet, which was directly deposited onto the substrate surface, forced the worms to use their jaws to capture the food particles, therefore exposing their anterior region.

The results obtained in this study reveal that density has a significant effect ($p < 0.001$) on somatic growth of *Marphysa* sp juveniles, and that densities higher than 1000 juveniles per m² cause high mortality (45%). Finally, it is important to highlight that the very territorial and aggressive behaviour evidenced by *Marphysa* “sp.” juveniles should be considered for aquaculture production. Further studies are required to determine the density effects for different developmental stages.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out within the scope of the Diversiaqua II project (Mar2020 01/02/16 FMP006).

REFERENCES

- Batista F M., Fidalgo e Costa. P., Matias D., et al. 2003. Preliminary results on the growth and survival of the polychaete *Nereis diversicolor* (OF Muller, 1776), when fed with faeces from the carpet shell clam *Ruditapes decussatus* (L., 1758). Bol. IEO 19: 443.
- Beukema J.J. 1995. Long-term effects of mechanical harvesting of lugworms *Arenicola marina* on the zoobenthic community of a tidal flat in the Wadden Sea. Neth. J. Sea Res. 33: 219-227 [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(95\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0077-7579(95)90008-X)
- Birchenough S. 2013. Impact of bait collecting in Poole Harbour and other estuaries within the Southern IFCA District. Fisheries Challenge Fund-Project FES 186. Great Britain: UK Marine Management Organisation (MMO).
- Bridges T.S., Farrar J.D., Gamble E.V., et al. 1996. Intraspecific density effects in *Nereis* (*Neanthes*) *arenaceodentata* Moore (Polychaeta: Nereidae). J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 195: 221-235. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(95\)00104-2](https://doi.org/10.1016/0022-0981(95)00104-2)
- Cabral S., Alves A.S., Castro N., et al. 2019. Polychaete annelids as live bait in Portugal: Harvesting activity in brackish water systems. Ocean Coast. Manage. 181 <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104890>
- Carvalho S., Constantino R., Cerqueira M., et al. 2013. Short-term impact of bait digging on intertidal macrobenthic assemblages of two south Iberian Atlantic systems. Est. Coast. Shelf Sci. 132: 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.06.017>
- Castro J.J. 1993. Impacte da exploração comercial e estrutura, dinâmica e produção da população de *Marphysa sanguinea* Annelida: Plychaeta) no estuário do Sado. Dissertation, University of Évora.
- Cole V.J., Chick R.C., Hutchings P.A. 2018. A review of global fisheries for polychaete worms as a resource for recreational fishers: diversity, sustainability, and research needs. Rev. Fish Biol. Fish. 28: 543-565. <https://doi.org/10.1007/s11160-018-9523-4>
- Elgetany A.H., El-Ghobashy A.E., Ghoneim A.M., et al. 2018. Description of a new species of the genus *Marphysa* (Eunicidae), *Marphysa aegypti* sp.n., based on molecular and morphological evidence, Invertebr. Zool. 15: 71-84. <https://doi.org/10.15298/invertzool.15.1.05>
- Esnault G., Retière C., Lambert R. 1990. Food resource partitioning in a population of *Nereis diversicolor* (Annelida, Polychaeta) under experimental conditions. In: Barnes M, Gibson R.N. (eds). Trophic relationships in the marine Environment. Aberdeen University, pp. 453-467.
- Gambi M.C., Castelli A., Giangrande A., et al. 1994. Polychaetes of commercial and applied interest in Italy: an overview. Mém. Mus. Nat. Hist. Natl. Paris 162: 593-602.
- Galaktionov O.S., Meysman F.J.R., Middelburg J.J. 2004. Bioirrigation in marine sediments: ecological conclusions from numerical modeling. Paper presented at XXI ICTAM Conference, Warsaw Poland, 15-21 August.
- Garcês J., Costa M.H. 2009. Trace metals in populations of *Marphysa sanguinea* (Montagu, 1813) from Sado estuary: effect of body size on accumulation. Sci. Mar. 73: 605-616. <https://doi.org/10.3989/scimar.2009.73n3605>
- Garcês J.P., Pereira J. 2010. Effect of salinity on survival and growth of *Marphysa sanguinea* Montagu (1813) juveniles. Aquac. Int. 19: 523-530. <https://doi.org/10.1007/s10499-010-9368-x>

- Glasby C.J., Mandario M.A., Burghardt I., et al. 2019. A new species of the *sanguinea*-group Quatrefages, 1866 (Annelida: Eunicidae: *Marphysa*) from the Philippines. *Zootaxa* 4674: 264-282. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4674.2.7>
- Relon D., Morineaux M., Desrosiers G., et al. 2006. Feeding and territorial behavior of *Paralvinella sulfincola*, a polychaete worm at deep-sea hydrothermal vents of the Northeast Pacific Ocean. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 329: 174-186. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.08.017>
- Hutchings P.A., Karageorgopoulos P. 2003. Designation of a neotype of *Marphysa sanguinea* (Montagu, 1813) and a description of a new species of *Marphysa* from eastern Australia. *Hydrobiologia* 496: 87-94. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0655-1_9
- Kristensen E. 2001. Impact of polychaetes (*Nereis* spp. and *Arenicola marina*) on carbon biochemistry in coastal sediments. *Geochem. Trans.* 12. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-2-92>
- Lavesque N., Daffe G., Bonifácio P., et al. 2017. A new species of the *Marphysa sanguinea* complex from French waters (Bay of Biscay, NE Atlantic) (Annelida, Eunicidae). *ZooKeys* 716: 1-17. <https://doi.org/10.3897/zookeys.716.14070>
- Lavesque N., Daffe G., Grall J., et al. 2019. Guess who? On the importance of using appropriate name: case study of *Marphysa sanguinea* (Montagu, 1803). *ZooKeys* 859: 1-15. <https://doi.org/10.3897/zookeys.859.34117>
- Lemieux H., Blier P.U., Dufresne F. et al. 1997. Metabolism and habitat competition in the polychaete *Nereis virens*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 156: 151-156. <https://doi.org/10.3354/meps156151>
- Levin L.A. 1982. Interference interactions among tube-dwelling polychaetes in a dense infaunal assemblage. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 65: 107-119. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(82\)90039-9](https://doi.org/10.1016/0022-0981(82)90039-9)
- Lewis C., Karageorgopoulos P. 2008. A new species of *Marphysa* (Eunicidae) from the western Cape of South Africa. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 88: 277-287. <https://doi.org/10.1017/S002531540800009X>
- Nesto N., Simonini R., Prevedelli D., et al. 2012. Effects of diet and density on growth, survival and gametogenesis of *Hediste diversicolor* (O.F. Müller, 1776) (Nereididae, Polychaeta). *Aquaculture* 362-363: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.07.025>
- Noda N., Tanaka R., Tsujino K., et al. 1994. Phosphocholine-bonded galactosylceramides having a tri-unsaturated long-chain base from the clam worm, *Marphysa sanguinea*. *J. Biochem.* 116: 435-442. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jbchem.a124543>
- Olive P.J.W. 1993. Management of the exploitation of the lugworm *Arenicola marina* and the ragworm *Nereis virens* (Polychaeta) in conservation areas: the importance of population structure and recruitment processes. *Aquat. Conserv.* 3: 1-24.
- Olive P.J.W. 1999. Polychaete aquaculture and polychaete science: a mutual synergism. *Hydrobiologia* 402: 175-183. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2887-4_9
- Parandavar H., Kim K.H., Kim C.H. 2015. Effects of Rearing Density on Growth of the Polychaete Rockworm *Marphysa sanguinea*. *Fish. Aquat. Sci.* 18: 57-63. <https://doi.org/10.5657/FAS.2015.0057>
- Pombo A., Baptista T., Granada L., et al. 2018. Insight into aquaculture's potential of marine annelid worms and ecological concerns: a review. *Rev. Aquac.* 12: 107-121. <https://doi.org/10.1111/raq.12307>

Reise K., Simon M., Herre E. 2001. Density-dependent recruitment after winter disturbance on tidal flats by the lugworm *Arenicola marina*. Helgol. Mar. Res. 55:161-165. <https://doi.org/10.1007/s101520100076>

Rosenberg R., Nilsson H.C., Hollertz K., et al. 1997. Density-dependent migration in an *Amphiura filiformis* (Amphiuridae, Echinodermata) infaunal population. Mar. Ecol. Prog. Ser. 159: 121-131. <https://doi.org/10.3354/meps159121>

Safarik M., Redden A.M., Schreider M.J. 2006. Density-dependent growth of the polychaete *Diopatra aciculate*. Sci. Mar. 70S3: 337-341. <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70s3337>

Scaps P., Retière C., Desrosiers G., et al. 1993. Effets de la ration alimentaire, de la densité intraspécifique et des relations entre individus sur la croissance des juvéniles de l'espèce *Nereis diversicolor* (Annelida: Polychaeta). Can. J. Zool. 71: 424-430. <https://doi.org/10.1139/z93-059>

Scaps P., Brenot S., Retière C., et al. 1998. Space occupation by the polychaetous annelid *Perinereis cultrifera*: Influence of substratum heterogeneity and intraspecific interactions on burrow structure. J. Mar. Biol. Ass. U.K. 78: 435-449. <https://doi.org/10.1017/S0025315400041540>

Taghon G.L. 1992. Effects of animal density and supply of deposited and suspended food particles on feeding, growth, and small-scale distribution of two spionid polychaetes. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 162: 77-95. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(92\)90126-U](https://doi.org/10.1016/0022-0981(92)90126-U)

Watson G. J. Murray J.M., Schaefer M., et al. 2016. Bait worms: a valuable and important fishery with implications for fisheries and conservation management. Fish Fish. 18: 374-388. <https://doi.org/10.1111/faf.12178>

Webber R.E. 1978. Respiration. In: Mill P.J. (ed) Physiology of annelids, Academic Press, London, pp. 369-392.

Zajac R.N. 1996. The effects of intra-specific density and food supply on growth and reproduction in an infaunal polychaete, *Polydora ligni* Webster. J. Mar. Res. 44: 339-359. <https://doi.org/10.1357/002224086788405310>

CAPÍTULO 3

MINI-ECOSISTEMA ACUÁTICO COMO MODELO DE ESTUDIO EN ECOFARMACOVIGILANCIA

Data de submissão: 08/07/2025

Data de aceite: 25/07/2025

Rafael Manuel de Jesús Mex-Álvarez

<https://orcid.org/0000-0003-1154-0566>

María Magali Guillen-Morales

<https://orcid.org/0000-0003-3958-0420>

David Yanez-Nava

<https://orcid.org/0000-0001-9604-526X>

María Esther Mena-Espino

<https://orcid.org/0000-0003-0624-3129>

Roger Enrique Chan-Martínez

<https://orcid.org/0009-0007-6563-9023>

Dylan Manuel Ferrer-Dzul

<https://orcid.org/0009-0004-8311-2995>

RESUMEN: La creciente contaminación de ambientes acuáticos por productos farmacéuticos representa un desafío ambiental global; así surge la ecofarmacovigilancia como disciplina para monitorear y evaluar estos riesgos, demandando modelos experimentales que integren la complejidad ecológica real. Los mini-ecosistemas

acuáticos, como microcosmos y mesocosmos, reproducen a pequeña escala redes tróficas y procesos biogeoquímicos; igualmente permiten estudiar los efectos directos e indirectos de fármacos en comunidades biológicas. Su diseño experimental considera la selección de especies representativas, el control riguroso de condiciones ambientales y la medición de parámetros físicoquímicos y biológicos relevantes. Aplicados principalmente a antibióticos, psicofármacos y antiinflamatorios, estos modelos revelan impactos en la reproducción, comportamiento, biodiversidad y procesos ecosistémicos. Los datos obtenidos alimentan modelos predictivos de riesgo ambiental, esenciales para la regulación y mitigación de contaminantes farmacéuticos; si bien presentan limitaciones de escala y complejidad, los mini-ecosistemas constituyen un valioso puente entre laboratorio y naturaleza, además, su integración con tecnologías avanzadas y la estandarización de protocolos fortalecerán su papel en la protección ambiental y el desarrollo sostenible.

PALABRAS CLAVE: salud ambiental; biomedicina; desarrollo sustentable.

1. INTRODUCCIÓN

Los fármacos son considerados contaminantes emergentes principalmente porque su demanda y uso han aumentado en las sociedades modernas y también debido

al desconocimiento de buenas prácticas de disposición final de medicamentos, sus envases y sus residuos. De esta manera, los fármacos ingresan a los ecosistemas por medio de las aguas residuales (domésticas, industriales y hospitalarias) y por actividades agropecuarias; posteriormente al interactuar con organismos expuestos a estos fármacos, se modifican su fisiología afectando a la biodiversidad y a la salud de todo el ecosistema.

Por ello, en los últimos años se ha consolidado la ecofarmacovigilancia como una ciencia interdisciplinaria que se encarga de la monitorización, evaluación, comprensión y gestión de los riesgos ambientales relacionados con la exposición a fármacos; en este sentido, existe la necesidad de diseñar y validar modelos experimentales que mimeticen las complejas relaciones e interacciones ecológicas que se presentan en ecosistemas naturales que permitan la traslacionalidad de los bioensayos.

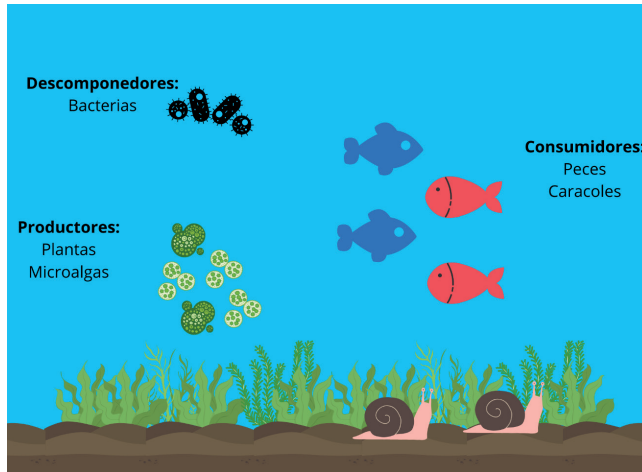
Uno de los modelos desarrollados para este propósito son los mini-ecosistemas acuáticos que son sistemas experimentales que reproducen en pequeña escala (del tamaño de una pecera doméstica) las relaciones físicas, químicas y biológicas que se dan en un ecosistema natural; así, los mini-ecosistemas acuáticos permiten evaluar de forma controlada la interacción de contaminantes, como los fármacos, con las comunidades biológicas y con cada uno de sus elementos pues no solamente se puede estudiar los efectos directos e indirectos de manera individual sino también se puede apreciar la dinámica de degradación o bioacumulación de los tóxicos.

El objetivo del presente capítulo es presentar al modelo de mini-ecosistema acuático con su fundamentación científica, sus posibles aplicaciones en estudios de ecofarmacovigilancia y las perspectivas actuales para la evaluación del impacto ambiental y sanitario de fármacos que permitan desarrollar políticas ambientales oportunas y estrategias de mitigación para un desarrollo sustentable de las comunidades.

2. PRINCIPALES CONCEPTOS DE UN MINI-ECOSISTEMA ACUÁTICO

El modelo experimental de mini-ecosistema acuático está diseñado para reproducir a pequeña escala las interacciones y procesos que se establecen y desarrollan en ecosistemas acuáticos naturales; su propósito es permitir el estudio de las dinámicas ecológicas en un sistema controlado que facilite el control de variables ambientales y la observación de respuestas biológicas en los distintos niveles tróficos.

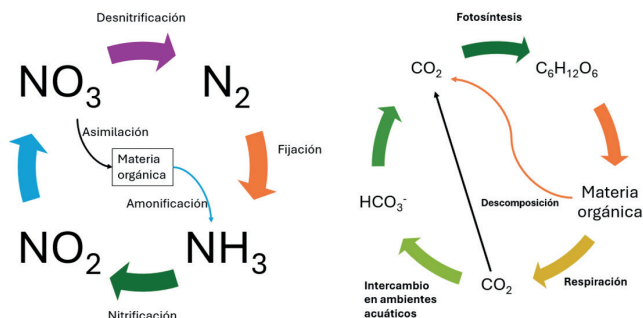
Figura 1. Cadena trófica en un mini-ecosistema acuático.



Los mini-ecosistemas acuáticos se pueden dividir en razón de su escala, en microcosmos y mesocosmos; los primeros son sistemas muy reducidos que contienen comunidades acuáticas simples y son de utilidad para estudiar a bajo costo y de manera rápida algún fenómeno ecológico. El tamaño del mesocosmo es mayor en comparación con el microcosmo, son acuarios más grandes o estanques artificiales y como permite incluir una mayor diversidad biológica y relaciones ecológicas más complejas se aproxima más a la realidad y es de mayor utilidad en estudios ambientales. Los mini-ecosistemas acuáticos buscan ser un modelo traslacional para redes tróficas, ciclos biogeoquímicos y homeostasis ecológica.

En particular, los ciclos biogeoquímicos pueden observarse en un miniecosistema acuático; así el ciclo del carbono, debido a la presencia de productores primarios como plantas acuáticas, algas o cianobacterias, el bióxido de carbono se convierte en materia orgánica en la fotosíntesis y por la respiración o descomposición de la materia orgánica se libera bióxido de carbono al medio, generalmente, como los cuerpos de agua de los mini-ecosistemas acuáticos son sistemas abiertos (con flujo de energía y masa) permiten que escape el bióxido de carbono.

Figura 2. Ciclos biogeoquímicos del carbono y del nitrógeno.



En cuanto al nitrógeno, su entrada al ecosistema es a través de alimento cuya descomposición metabólica produce amonio, nitrato y nitrito; en la amonificación, la materia orgánica de compuestos ricos en nitrógeno se convierte a amonio que en la nitrificación ejercida por bacterias se transforma en nitrito (Nitrosomonas) y ulteriormente a nitrato (Nitrobacter, Nitrospira), de estos el nitrito puede ser más tóxico para los seres vivos. La asimilación del nitrógeno se da por los organismos vegetales que absorben amonio o nitrato y lo convierten en aminoácidos y otros compuestos útiles; si existiera condiciones anóxicas ocurre la desnitrificación que es la conversión de nitrato a nitrógeno gaseoso. El ciclo de nitrógeno en miniecosistemas acuáticos es un proceso clave para mantener el equilibrio ecológico al controlar la productividad primaria y regular la calidad del agua, en sistemas cerrados o semicerrados como los acuarios experimentales, este ciclo se afecta intensamente por factores bióticos y abióticos, también por contaminantes, en especial los antibióticos. De hecho, el efecto de los antibióticos sobre el ciclo del nitrógeno en acuarios es un tema crítico en acuicultura porque pueden alterar significativamente a las comunidades bacterianas involucradas en el ciclo; esto provoca una acumulación de amoníaco y nitrito que son altamente tóxicos para los peces.

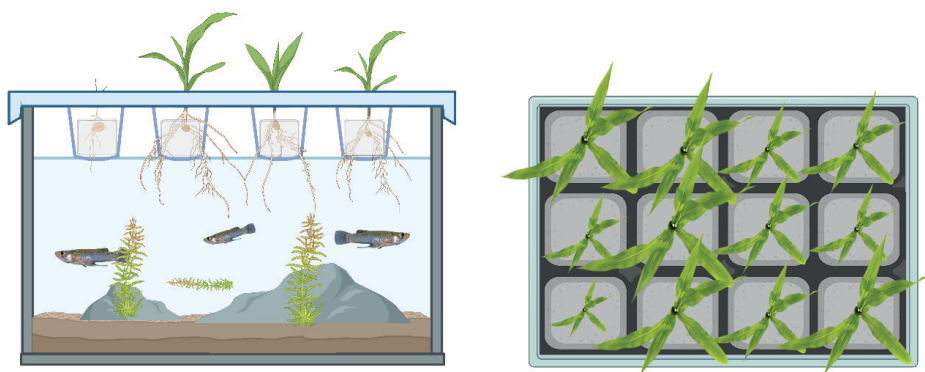
Además, el efecto de antibióticos sobre el ciclo de nitrógeno se da porque reduce la diversidad bacteriana y disminuye la presencia de géneros claves en filtros biológicos; también, altera la sucesión microbiana porque las bacterias resistentes pueden proliferar y alterar la dinámica del ciclo. Los factores más influyentes en el impacto de antibióticos sobre el ciclo de nitrógeno son el tipo y concentración, la duración de la exposición, resistencia y persistencia del antibiótico en el medio, tipo de medio (dulce, salobre, salado), presencia de biofiltros y elementos bióticos, particularmente, plantas. En estudios ambientales se usa el impacto en el ciclo del nitrógeno como un biomarcador indirecto de la disbiosis bacteriana (desequilibrio en la composición o función de una comunidad

microbiana) y en estudios de ecofarmacovigilancia, estas alteraciones, permiten evaluar la persistencia y toxicidad ecológica de los fármacos.

3. APLICACIÓN DEL MODELO DE MINI-ECOSISTEMA ACUÁTICO EN ECOFARMACOVIGILANCIA

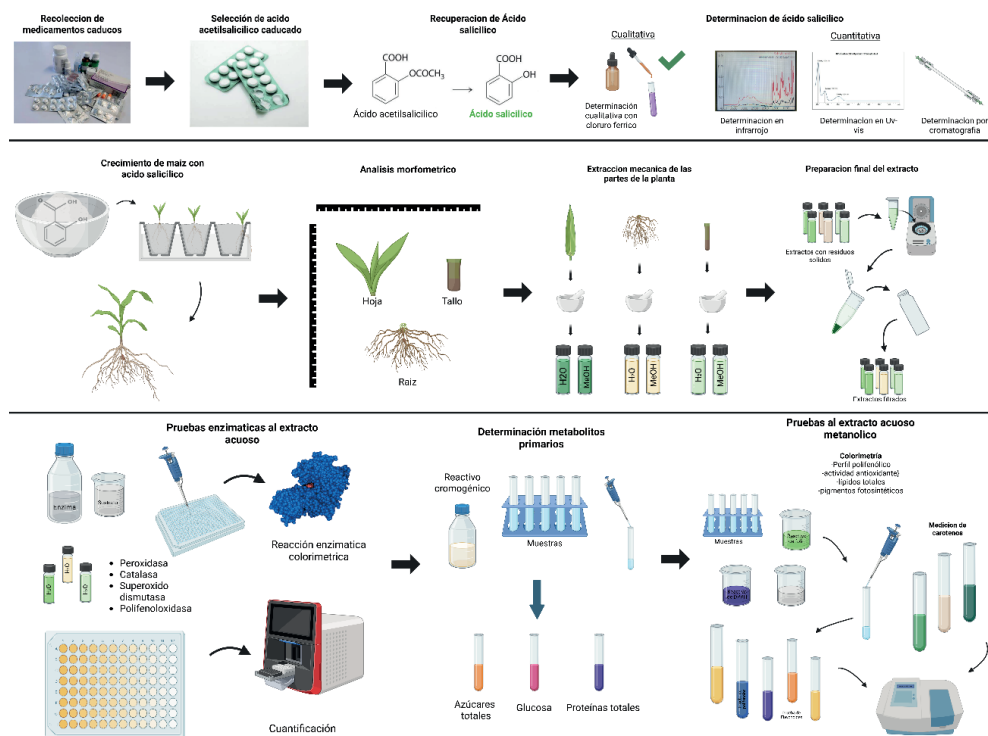
Debido a que los fármacos son contaminantes emergentes en las sociedades modernas por su alto consumo y por la falta de un tratamiento residual adecuado que evite que estos compuestos químicos alcancen a los ecosistemas, se hace necesario contar con herramientas científicas que permitan comprender y estudiar el impacto de los medicamentos y sus principios activos sobre el ecosistema. Generalmente, el efecto de los fármacos en cada uno de los elementos constituyentes del ecosistema depende del grupo farmacoterapéutico al que pertenezca y de su estructura química; algunos son intuitivos por su mecanismo de acción, como el caso de los antibióticos que altera el equilibrio ecológico al inhibir el crecimiento de bacterias nitrificantes o desnitrificantes; otros tipos de fármacos como los antidepresivos pueden alterar la actividad fotosintética de los productores primarios macroscópicos como son las plantas acuáticas. En este sentido, el monitoreo de nutrientes y gases disueltos en el agua del ecosistema permite al investigador evaluar los efectos subletales de cada principio activo sobre el ecosistema.

Figura 3. Cultivo acuapónico de maíz acoplado a un mini-ecosistema acuático (Fuente: elaboración propia).



El modelo de mini-ecosistema acuático es una herramienta versátil para emplearse en ecofarmacovigilancia, particularmente cuando se pretende estudiar los efectos de los fármacos, en condiciones más controladas, pero ecológicamente representativas porque es un sistema experimental a pequeña escala que simula un ecosistema real con inclusión de las interacciones entre componentes bióticos y abióticos.

Figura 4. Modelo del maíz (*Zea mays*) en ecofarmacovigilancia empleando un mini-ecosistema acuático.



Mientras los ensayos *in vitro* o los modelos computacionales se centran en efectos celulares o teóricos, los miniecosistemas permiten evaluar respuestas ecológicas integradas, incluyendo efectos indirectos y de interacción entre especies. Además, complementan los estudios *in vivo* tradicionales, que suelen centrarse en pocas especies bajo condiciones muy controladas. Los datos obtenidos en miniecosistemas permiten establecer umbrales de concentración segura, detectar efectos crónicos, y anticipar impactos en la estructura y función del ecosistema, lo que es fundamental para diseñar estrategias de mitigación y regulación ambiental.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL EN MINIECOSISTEMAS

El diseño de un miniecosistema acuático para estudios en ecofarmacovigilancia debe ser cuidadosamente planificado para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados, así como para asegurar que las condiciones experimentales sean representativas del ambiente natural. Para ello, la selección de los especímenes de estudio es relevante y fundamental para el éxito del modelo; se debe considerar como criterios base: la relevancia ecológica de las especies, favoreciendo a las especies endémicas o

representativas del ecosistema estudiado; la sensibilidad a los fármacos de las especies seleccionadas, especialmente la capacidad de detección de efectos tóxicos a dosis subletales de la especie considerada que sirva como biomonitor de la calidad ambiental al detectar cambios a través de sus respuestas fisiológicas, bioquímicas o ecológicas al usar algunos de sus parámetros bioquímicos como biomarcador; un punto importante a considerar es la facilidad de manejo de las especies objetivo, se prefiere ciclos de vidas cortos y que puedan reproducirse en cautiverio; la diversidad funcional es importante para simular las interacciones tróficas y que realmente funcione como un ecosistema, por ello se debe incluir productores (*Lemna minor*, *Elodea*, *Chlorella*, *Spirulina*), consumidores primarios (*Daphnia magna*), consumidores secundarios como peces (*Danio rerio*, *Poecilia reticulata*, *Gambusia yucatana*), descomponedores (*Pomacea caniculata*, *Planorbis corneus*, *Melanoides tuberculata*) y microbiota.

5. CONDICIONES DEL ECOSISTEMA

El tamaño del ecosistema puede variar desde frascos de vidrio para microcosmo hasta tanques o estanques para mesocosmos; pero el más empleado son peceras de vidrio donde se puede regular la temperatura, la iluminación y la aireación, otros factores que deben monitorearse y controlarse son el pH y la dureza del agua. Se recomienda, en especial mientras se llegue al equilibrio, recambios de agua para mantener concentraciones estables y condiciones saludables; algunos parámetros fisicoquímicos medibles que pueden monitorearse son el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, la turbidez y la conductividad.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos esperados en la mayoría de los miniecosistemas acuáticos modelos (variará dependiendo de las especies particulares estudiadas).

Parámetro	Rango ideal	Relevancia biológica
Temperatura	24-27°C	Afecta al metabolismo de peces y solubilidad del oxígeno
pH	6.8 a 7.5	Influye en la especiación química de iones electrolitos débiles como el amonio y el carbonato. Algunas especies como <i>Poecilia</i> prefieren ambientes más alcalinos, otras como los <i>Betta</i> prefieren un medio ácido.
Dureza total	143 a 215 mg/L	La dureza total se debe principalmente a la concentración de iones calcio y magnesio y afecta la solubilidad de sus contra iones como carbonato y sulfato, también es un parámetro importante para el equilibrio osmótico de los peces, algunas especies prefieren aguas blandas, otras como <i>Poecilia</i> requieren aguas duras.
Alcalinidad	70 a 145 mg/L de CaCO ₃	Mide la capacidad del sistema para estabilizar el pH y actuar como amortiguador.

Oxígeno disuelto	Mayor a 5 mg/L	Fundamental para conocer la concentración de oxígeno presente en el agua pues es fundamental para la respiración de peces, bacterias y plantas.
Conductividad eléctrica	150 a 500 mS/cm	Es un indicador de electrolitos presentes en el agua como son las sales disueltas, es útil para monitorear la estabilidad del sistema.
Turbidez	Menor a 1 NTU	Es un indicativo de presencia de materia orgánica, algas o bacterias.
Bióxido de carbono	10 a 30 mg/L	Es necesario para que las plantas puedan realizar la fotosíntesis.

7. CONSIDERACIONES ÉTICAS Y REGULATORIAS

Con el fin de asegurar el bienestar animal y la integridad científica que pueda trasladarse al ámbito ambiental debe considerarse cuestiones éticas y normativas. Como todo manejo de animales de experimentación, es fundamental minimizar el sufrimiento y el estrés; conviene promover el desarrollo de métodos complementarios como modelos *in vitro* y simulaciones computacionales para aplicar el principio de las 3R (reemplazo, reducción y refinamiento) para optimizar el uso de especímenes experimentales. En cuanto a la normativa aplicable se aconseja seguir las directrices de la OECD, las regulaciones de la EMA y de la FDA que orientan la evaluación y el monitoreo ambiental de productos farmacéuticos.

La estandarización de los protocolos de estudio permite abona a la reproducibilidad y a la repetibilidad que conduce a la validación de los métodos empleados, esto permite que los resultados sean aceptados en procesos regulatorios. En este sentido, los datos generados sirven como sustento científico para promover la sustentabilidad ambiental y contribuir a la elaboración de políticas públicas para una adecuada gestión del uso y disposición de fármacos.

8. VISIÓN A FUTURO PRÓXIMO

El sistema tiene algunas limitaciones como modelo de estudio, pues a pesar de que los mini ecosistemas acuáticos reproducen muchos tipos de interacciones ecológicas, está claro que no se puede replicar por completo la complejidad del ambiente natural, por la gran heterogeneidad que representa una escala mayor. Otro punto importante, es el tiempo de estudio, en un modelo como el mini ecosistema acuático por lo general se realizan estudios de corto o mediano plazo, esto limita la evaluación de efectos crónicos y acumulativos a largo plazo.

Tal vez el aspecto más limitativo es la selección restringida de especies que se pueden emplear lo que origina omisiones de interacciones ecológicas relevantes; en

este mismo sentido, debido a que en condiciones experimentales se controla algunos parámetros (como el pH, temperatura, luz, salinidad u oxígeno disuelto) esto limita la apreciación del efecto de la variabilidad natural de estos factores en el ecosistema.

Ante tales limitaciones, surgen algunas perspectivas que se pueden transitar en un futuro próximo, tales como la integración del modelo con tecnologías de sensores automatizado o monitoreo remoto y técnicas de imagen con el fin de obtener datos en tiempo real y con una mayor precisión de la variabilidad. No cabe duda de que mientras más complejidad se vaya insertando a cada modelo propuesto más próximo a la realidad será y en consecuencia la traslacionalidad de los datos será más fácil, así se puede incorporar la interacción suelo-agua-planta como en los modelos de acuaponía, así como otros modelos que incluyan efectos multifactoriales como simulaciones de cambio climático o estudio de contaminantes múltiples.

Por lo complejo de tema, es menester la convergencia de distintas disciplinas como la ecotoxicología, la química, la microbiología, la farmacología, biólogos moleculares, entre otras, que mejoren el modelo desde sus respectivos puntos de vista de abordar el problema de la contaminación ambiental por fármacos y cuyo trabajo en equipo conduzca al desarrollo de guías aplicables para la construcción y evaluación de mini ecosistemas acuáticos útiles, reproducibles y con una robustez analítica que se pueda emplear en estudios de ecofarmacovigilancia.

9. CONCLUSIONES

Los mini ecosistemas son una aproximación científica a un problema complejo como es la contaminación ambiental de ecosistemas acuáticos por fármacos, debido en parte a que permiten evaluar de manera controlada e integrada los efectos de los principios activos en contextos similares, aunque simplificados y a escala, a los del ecosistema natural, reflejando mejor las dinámicas ecológicas. Los mini ecosistemas acuáticos facilitan la detección de efectos subletales, cambios en la estructura trófica y procesos de bioacumulación, biotransformación, interacción ecológica y degradación.

A pesar de sus limitaciones debido a su escala y complejidad, estos modelos de estudio son un punto de unión entre la investigación básica de frontera y la aplicación práctica regulatoria porque fortalece la vigilancia ambiental farmacéutica.

REFERENCIAS

Calvache, J. A. E., Segura, N. E. M., & Rojas, I. C. S. (2023). Efectos del Naproxeno como Contaminante Emergente en Ecosistemas Acuáticos. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias-FAGROPEC*, 15(2), 44-63.

Castro-Pastrana, L. I., Baños-Medina, M. I., López-Luna, M. A., & Torres-García, B. L. (2015). Ecofarmacovigilancia en México: perspectivas para su implementación. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 46(3), 16-40.

Checa Artos, M., Sosa del Castillo, D., Ruiz Barzola, O., & Barcos-Arias, M. (2021). Presencia de productos farmacéuticos en el agua y su impacto en el ambiente. *Bionatura*, 6(1), 1618-1627.

Contreras-Almazo, I. A. E., & González-Rentería, M. (2022). Bivalvos, organismos modelo en el biomonitorio del riesgo ecotoxicológico de los antiinflamatorios no esteroideos (AINE) para los ecosistemas acuáticos. *Ecosistemas*, 31(2), 2167-2167.

Gagneten, A. M., & Regalado, L. M. (2021). Efectos sobre las comunidades biológicas.

García-Alcalde, M., Minaya, D., Alvarino, L., Iannacone, J., & Rodríguez, A. (2023). Ensayos ecotoxicológicos para evaluar antibióticos y ansiolíticos en el ambiente acuático. *Producción+ Limpia*, 18(1), 64-84.

Laborde, J. M., Carbone, C., Ayala, M. Á., & Cagliada, M. D. P. L. (2021). Peces como animales de experimentación. *Libros de Cátedra*.

Muñoz-Bejarano, M. J., Ruiz Rodríguez, Y., Sáenz-García, G., & Alfaro-Mora, R. (2021). Análisis del desecho de medicamentos en Costa Rica durante el 2019, un paso hacia la ecofarmacovigilancia. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 50(2), 423-438.

Salazar, C. S., & Jiménez, J. O. (2023). Consideraciones Bioéticas en el Manejo de Modelos Animales en Experimentación. *Revista Fesahancocal*, 9(1), 12-26.

Tomasini, A., & Macías-Paredes, C. (2023). ¿ Por qué los fármacos son contaminantes del ambiente?. *Contactos*, *Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (129), 48-55.

CAPÍTULO 4

CONTROL PROGRAM OF SHEEP COCCIDIOSIS IN THE PRODUCTION CHAIN FROM THE BREEDER TO THE CONSUMER

Data de submissão: 24/06/2025

Data de aceite: 11/07/2025

Academician Dr Ivan Pavlović

Principal Research Fellow
Scientific Institute of Veterinary
Medicine of Serbia
Belgrade, Serbia

<https://orcid.org/0000-0003-4751-6760>

Dr Aleksandra Tasić

Senior Research Associate
Scientific Institute of Veterinary
Medicine of Serbia
Belgrade, Serbia

<https://orcid.org/0000-0002-8361-5697>

Prof Dr Jovan Bojkovski

Faculty of Veterinary Medicine
University in Belgrade
Belgrade, Serbia

<https://orcid.org/0000-0001-7097-2559>

ABSTRACT: Sheep farming holds significant economic and cultural value in Serbia, with increasing attention given to improving health and production outcomes. Among the challenges faced in sheep husbandry, parasitic diseases - especially protozoan infections like coccidiosis caused by *Eimeria* and *Cryptosporidium* species - are prevalent and

economically detrimental, particularly in young lambs. This study presents a comprehensive, multi-year control program for ovine coccidiosis, implemented across nine farms from 2014 to 2018. The program combined systematic parasitological monitoring, targeted therapeutic interventions (notably the use of Toltrazuril), and the application of biosecurity, zootechnical, and prophylactic measures in both pens and pastures. Initial diagnostics showed a high prevalence of subclinical and clinical infections, with lambs being the most affected group. Through successive parasitological examinations and treatments, a significant reduction in oocyst shedding and clinical cases was achieved. By fostering natural immunity through controlled subclinical exposure and timing of therapeutic intervention, the program effectively transformed coccidiosis from an acute production-limiting disease to a managed endemic condition. The study highlights the importance of integrated, farm-specific health strategies and underscores the role of veterinarians in implementing sustainable parasite control measures in sheep flocks in Serbia.

KEYWORDS: coccidiosis control; sheep health; *Eimeria* infection; Toltrazuril treatment; parasitic disease management.

1. INTRODUCTION

Sheep breeding is an important branch of livestock production in Serbia. Despite the

fact that the number of sheep and goats in the social and individual sector of production varies from time to time, this branch of the economy and its improvement is being paid more and more attention. The reason for this lies not only in tradition, but also in the knowledge that the breeding of small ruminants represents a significant economic item, both due to the production of wool and milk, as well as lamb meat, a highly sought after item on the world market.

The improvement of this production is related to solving a number of different problems, which aim primarily to increase the economy while preserving the health and well-being of the animals. Within the scope of these tasks, primary attention must certainly be paid to health care, including the suppression and control of parasitic infections, among which protozoa occupy a significant place, and some are also zoonoses.

The stable method of keeping small ruminants with a large number of animals in a relatively small space, with a uniform microclimate and a deep mat favors contamination with protozoan pathogens and infections, especially coccidia, especially for younger categories of animals. Based on research in the world and in our country, diseases of parasitic etiology dominate in sheep both in terms of prevalence and incidence, accompanied by significant morbidity and low to moderate mortality.

The damage that occurs in this production is a consequence of the indirect negative pathogenic effects of the parasite on the host organism. In favorable conditions for the development and survival of parapatric stages in the external environment, the conditions for infections of greater intensity, often with a greater number of parasite species, with different localization in the host organism are obtained. The consequence of this is the development of a clinically manifested disease, with the death of a large number of individuals, most often among the younger categories.

The fact is, however, that in most cases, parasitic infections occur subclinically, that is, “imperceptibly” to the eye of the herdsman. Negative economic effects are also present in these situations and are manifested by a decrease in animal production, i.e. a decrease in the production of wool and milk, poorer grooming of young animals, a decrease in general body resistance, i.e. increased susceptibility to agents of other etiologies.

2. COCCIDIOSIS OF SHEEP

When we say coccidiosis, we usually mean the disease caused by protozoa from the family phylum *Apicomplexa* - genus *Eimeria* and genus *Cryptosporidium*.

Coccidia are intracellular parasites strictly specific for the host species and for the segment of the digestive tract in which they parasitize. Unsporulated oocysts (and

therefore non-infectious) are excreted in the faeces of infected individuals. Apart from the *Eimeridae* family, the coccidia genus includes far more dangerous zoonotic species - *Cryptosporidium* sp., *Toxoplasma* sp. and *Sarcocystis* sp. but they are present in a small percentage, except for the genus *Cryptosporidium*, in sheep flocks in Serbia. As coccidia from the genera *Eimeria* and *Cryptosporidium* are the primary and most important causes of illness in lambs, our goal was aimed at their control.

The genus *Eimeria* are intracellular parasites strictly specific for the host species and for the segment of the digestive tract in which they parasitize. Unsporulated oocysts (and therefore non-infectious) are excreted in the faeces of infected individuals. The life cycle of coccidia is direct and very short. It lasts less than 7 days. Oocysts expelled in faeces sporulate in the external environment in 1-2 days (this is called sporogony and during it sporocysts are created, the number of which is characteristic for each genus).

When susceptible individuals ingest infectious oocysts, sporozoites are released in the digestive tract. They enter intestinal epithelial cells, round up, grow and become first-generation schizonts. This is how asexual reproduction begins - schizogony, which takes place through several generations of schizonts that produce a large number of primary merozoites, which leave the host cell, enter a new epithelial cell, round up, grow and produce secondary schizonts. They further produce large numbers of second-generation merozoites, which exit the host cell. Some enter new intestinal epithelial cells, round up and become third-generation schizonts, which produce third-generation merozoites. From the largest number of merozoites of the II generation, macro- and microgametocytes are formed, which initiates sexual reproduction - gametogonia. The maturation of macro- and micro gametocytes gives rise to micro and macrogametes. Microgametes fertilize macrogametes and a zygote is formed. The zygotes mature and form young oocysts, which are excreted in the feces. The oocysts then sporulate and are ready for a new round of infection.

Coccidiosis finds very favorable conditions for its development in the modern livestock production system, where a large number of individuals are kept in a small space.

Only depending on the fulfillment of zoohygienic and zootechnical conditions and preventive measures used in certain types of production, coccidiosis will pass in a latent form or will be in a clinically manifest form followed by a large death.

Sheep coccidiosis occurs in an acute and chronic course, with high morbidity, a rarer clinical manifestation occurring in lambs. Adult animals do not show a clinical picture of coloring, but they are transmitters of this disease to younger categories.

The causative agents of sheep infections are: *Eimeria ahsata*, *E. ammonis*, *E. arkhari*, *E. crandallis*, *E. dalli*, *E. danielle*, *E. faurei*, *E. gilruthi*, *E. gonzalezi*, *E. granulosa*, *E.*

intricata, *E. marsica*, *E. ninakohlyakimovae*, *E. ovina*, *E. ovinoidalis*, *E. pallida*, *E. parva*, *E. punctata* and *E. rachmatullina*.

Unsporulated oocysts are excreted in the feces of infected individuals, which sporulate in the external environment and become infectious. Goats are infected with oocysts through contaminated food and water.

The site of parasitism is the small intestine. The clinical picture is present only in younger animals when there is greenish or yellow watery diarrhea with an unpleasant smell, and sometimes blood is also present. Abdominal pain, sometimes anemia, loss of appetite, dehydration, tenesmus, weakness and weight loss, depression and inactivity in the form of diarrhea up to exhaustion occur (occurs only in severe infection). The disease is characterized by a moderate number of infected animals and low mortality. The pathoanatomical finding consists of edema of the mucous membrane of the small intestine with a mucofibrinous layer and whitish-yellowish nodules scattered throughout the intestines that are also visible from the serous side, and less often hemorrhagic enteritis.

The genus *Cryptosporidium* has long been considered a commensal stain, to establish that it represents a dangerous zoonotic pathogen. Cryptospores show monoxony according to the vertebrate class in which the host is found, so that interspecies infection is possible only to that extent. Cryptospore oocysts are small and spherical, 5-7 micrometers in diameter, without micropyle and polar cap. The oocyst wall is surrounded by a thick membrane and is colorless. Sporulated oocysts have 4 sporozoites. The development of the parasite in the host is identical to that of other coccidia, except for the location of the causative agent. Unlike other coccidia that are implanted in the microvilli of the intestine during the schizogonic phase, cryptospores form a parasitophorous vacuole in the microvillus located between the outer membrane and the cytoplasm of the microvilli. The spraying of these vacuoles causes much more serious lesions and damage to the intestinal epithelium than in infections with other types of coccidia. The sexual part (gametogonia) is identical to that of other coccidia, and newly fertilized oocysts continue their development intracytoplasmically before excretion and leave the host as infectious oocysts.

Cryptosporidiosis of small ruminants is caused by *Cryptosporidium parvum*, *C. hominis* (previously *C. parvum* genotype 1), *C. canis* and *C. felis*. All the mentioned species are zoonotic. Infections are caused by ingestion of oocysts through contaminated food and water. The development of the parasite in the host is identical to that of other coccidia, except for the location of the causative agent. Unlike other coccidia that are implanted in the microvilli of the intestine during the schizogonic phase, cryptospores

form a parasitophorous vacuole in the microvillus located between the outer membrane and the cytoplasm of the microvilli.

The spraying of these vacuoles causes much more serious lesions and damage to the intestinal epithelium than in infections with other types of coccidia. The sexual part (gametogonia) is identical to that of other coccidia, and newly fertilized oocysts continue their development intracytoplasmically before excretion and leave the host as infectious oocysts. The disease occurs clinically only in animals at the age of 4-10 days and is characterized by a large number of infected animals and considerable mortality.

Symptoms of acute cryptosporidiosis are loss of appetite and weight loss. In the clinical picture, there is yellow-brown watery diarrhea with an unpleasant smell, and sometimes blood is also present. Abdominal pain occurs, sometimes anemia, loss of appetite, dehydration, tenismus, weakness and weight loss. Depression and inactivity occur.

Pathological changes are present in the small intestines in the form of thickening, edema, hyperemia of the mucosa of the cecum and colon. In addition, there may be numerous hemorrhages and the finding of a dark brown mucofibrinous layer. These pathological changes lead to difficult resorption of nutrients, but also to the clinical manifestation of the disease. As a consequence of cryptosporidiosis, there is a significant decrease in the growth of kids, their lower vitality and weaker progress.

2. PRESENCE OF THIS SHEEP COCCIDIOSIS IN THE WORLD

Infections with protozoa from the genus *Eimeria* and *Cryptosporidium* are the most widespread and we have data on them in research from Australia, Africa, North and South America, Asia and Europe. Numerous data from world literature support the fact that coccidiosis is the most common parasitic disease of sheep in herds. All over the world, an extremely large number of older animals are infected with protozoa, which are involved in the etiology of this disease. It is of even greater importance that the infection of the young that occurs already in the first months of life.

At the same time, adults are the main contaminant of herds and are responsible for maintaining parasitic infections in herds. Their presence has been noted equally in the most modern, hygienically impeccable cultivation conditions as well as in extensive keeping. In the foreign literature, there are extremely numerous data on the study of protozoan infections of sheep and goats, and they all confirm this claim.

Based on existing data, the prevalence of coccidiosis is highest in environments where the most intensive keeping is in stable conditions. In contrast to helminths, which need free grazing areas for biological development, protozoan infections are related to

animal husbandry where there is a permanent microclimate, especially temperature and humidity. In addition, a large number of animals of different ages in a relatively small area leads to population pressure that favors the development of protozoa and thus infections.

In countries with extremely developed sheep farming (China, India, Australia, Nigeria, UK, Greece), coccidia represent a major health and economic problem, as well as in third world countries. That's why program control measures with coccidiostat treatments are applied there. It is based on drug therapy and prevention that we present here

- Treatment of coccidiosis caused by *Eimeria* sp. -

Sulfaquinoxaline in drinking water (concentration 0.015% for 3-5 days) can be used to treat affected lambs. Sulfamethazine (sulfadimidine) can be administered at a dose of 247.5 mg/kg on the first day, then 124 mg/kg for 3 days. Sulfadimethoxine is administered at a dose of 55 mg/kg on the first day, then 27.5 mg/kg for 3 days, orally or in drinking water. Because water intake is often reduced, sick animals should be medicated by feeding or drenching.

Triazinon preparations belonging to the benzene acetonitrile group: diclazuril (1 mg/kg, PO, once or repeated 3 weeks later) is licensed in some countries without a withdrawal period and the preparation Toltrazuril (20 mg/kg, PO, once) used to reduce the number of oocysts. Ponazuril, a metabolite of toltrazuril, is also suggested for the control of coccidiosis in sheep.

Decoquinate (1 mg/kg, PO in feed, every 24 hours for 28 days) is licensed in some countries, including the USA, for young, non-lactating ewes; it is mixed into the medicated meal at the recommended 100 mg/kg of feed, which provides 100 g of feed for a 10 kg lamb for 28 days. Decoquinate can prevent reduced neutrophil function due to parasites.

Amprolium (50–55 mg/kg, PO, every 24 hours for 5 days) has proven efficacy but is not registered for sheep, so its use is not always completely acceptable in some countries (eng. off label use) and should be under veterinary control. Use in lambs is controversial because it can cause thiamine deficiency and related neurological diseases. As a precaution, thiamine (vitamin B1) is also often given after treatment.

- Prevention of coccidiosis –

The protocols used in the world define the combination of monensin and lasalocid (in a dose of 22 and 100 mg/kg of food respectively) which provide an effective prophylactic effect against coccidiosis that occurs in early weaned lambs in feedlot conditions.

Monensin is used in the USA as a component of a concentrate ration at 15 g/ton and is given to ewes from 4 weeks pre-lambing until weaning, and to lambs from 4-20

weeks of age. The toxicity level for lambs is 4 mg/kg, while for goats in the US it is only approved for stable conditions, not for grazing animals.

Lasalocid (15–70 mg per sheep per day, depending on body weight) alone or in combination with monensin and lasalocid (dose: from 22 or 100 mg/kg feed), is also used prophylactically against coccidiosis in early weaned lambs in farm conditions.

Feed decoquinate is approved in many countries for the control of coccidia in feed lambs (1 mg/kg, PO feed, every 24 hours for 28 days). It is also effective in reducing oocyst shedding when sheep are continuously fed dry feed at 0.5 mg/kg (use of 60 g/kg premix at 833 g/ton feed provides a recommended treatment dose of 50 mg/kg feed). Duration of therapy of at least 28 days should be ensured.

Toltrazuril (20 mg/kg, PO, once) is approved for use in many countries prophylactically, before expected shedding of oocysts. Diclazuril (1 mg/kg, PO, once, with a possible second dose 3 weeks later) is also permitted in some countries for sheep aged 4–6 weeks. The doses used are also therapeutic, and the effectiveness of these preparations and their combinations has been proven on several animal species.

- Treatment of coccidiosis caused by *Cryptosporidium* sp.-

As no specific ovine treatment measures are available at present, only the symptoms can be treated, by keeping lambs warm and giving rehydration therapy. However, in some cases, it is possible to use calf treatments, such as Halocur (Halofuginone lactate) off-licence under the Veterinary Medicines Directorate cascade, speak to your veterinarian for further information.

- Prevention of Cryptosporidiosis –

In the face of an outbreak of cryptosporidiosis in lambs there is little that can be done other than to isolate affected stock, avoiding overcrowding or prolonged use of contaminated areas. The tiny, fragile looking oocysts are in fact remarkably tough, and can survive in the environment for many months. Disinfection can be achieved by steam heat or by using Oo-cide (Antec International Ltd.), an ammonia-based oocysticide, which is particularly effective against *Cryptosporidium* oocysts.

Many treatment plants that take raw water from rivers, lakes, and reservoirs for public drinking water production use conventional filtration technologies. Direct filtration, which is typically used to treat water with low particulate levels, includes coagulation and filtration but not sedimentation. Other common filtration processes including slow sand filters, diatomaceous earth filters, and membranes will remove 99% of *Cryptosporidium* membranes and bag- and cartridge-filter products remove *Cryptosporidium* specifically.

Cryptosporidium is highly resistant to chlorine disinfection; but with high enough concentrations and contact time, Cryptosporidium inactivation will occur with chlorine dioxide and ozone treatment. In general, the required levels of chlorine preclude the use of chlorine disinfection as a reliable method to control Cryptosporidium in drinking water. Ultraviolet light treatment at relatively low doses will inactivate Cryptosporidium

3. PRESENCE OF SHEEP COCCIDIOSIS IN SERBIA

Research on the intestinal protozoan fauna of sheep in Serbia was carried out in the mid-fifties of the last century and was primarily of a faunal nature, with monitoring of prevalence. Then there was a slightly longer time break (of about half a century) so that there are almost no valid data from the earlier period.

The continuation of these researches began at the end of the nineties. In the 2000s, several projects of the Ministry of Education, Science and Technological Development were launched. Thanks to them, research on the parasitic fauna of sheep and goats gained full momentum. In twenty years, herds of small ruminants from Vojvodina to Northern Kosovo were covered. Biodiversity and seasonal dynamics of ectoparasites (primarily ticks), helminths and protozoa in small ruminants were determined.

In the mentioned period, it was determined that the dominant infection of small ruminants was caused by coccidia from the genus *Eimeria*, which ranged from 26.31 to 39.78%. Cryptosporidiosis was observed in the range from 3.22% to 4.90%.

The influence of parasitic infections on the production results and economic aspects of these infections were investigated. New testing methods were developed and modified, some of which were later protected by the Intellectual Property Office of the Republic of Serbia. During these 20 years of research, biosecurity measures necessary for high-quality and profitable production were developed.

Based on these findings, in addition to the primary suppression of parasites in individual herds, measures were also developed for the preventive rehabilitation of pastures and the development of prophylaxis measures and improvement of the keeping conditions of sheep and goats as a primary task. All this was accompanied by published works, with several monographs and works presented at international and national meetings.

4. COMPREHENSIVE PROGRAM FOR THE CONTROL OF COCCIDIOSIS IN SHEEP

The main goal of the comprehensive program for the control of coccidiosis in sheep is to raise the health status of sheep in the Republic of Serbia. By preventing the

occurrence and spread of coccidiosis by undertaking certain biotechnical and health measures that have the role of reducing the prevalence of parasites, higher growth and better production results of sheep are achieved. The application of this integrated concept of parasite infection control required systematic monitoring of infection on farms, before and after the applied measures, and required the involvement of all relevant subjects, primarily the veterinary service, starting from farms to animal workers.

The coccidiosis control program was experimentally carried out and applied to nine test farms that raise sheep in herds with more than 50 animals, starting from 2014 to 2018. After the evolution of rejected results, it became a vital zootechnical measure on those farms.

In order to establish the prevalence of parasitic infections and the biodiversity of the causative agent in the investigated sheep herds, samples of feces of all categories of animals were collected. On each of the farms, 30 samples of feces were sampled: 10 from each production category - lambs/kids at teats (from 0 to 28 days of age), rearing animals (before the first release) and breeding animals.

Collected faeces samples were processed by usual parasitological examination methods. We performed examinations for parasites both during the necropsy of dead animals and on the slaughter line. All applied diagnostic methods were in accordance with WFP-EFP, WHO, FAO and OIE recommendations. All parasites were determined on the basis of morphological characteristics, according to the keys given by Soulsby.

On the basis of the obtained findings, the application of a number of solutions was started, which as a whole were incorporated into a single unit whose goal is the control of parasitic infections on pasture and in pens and finally their eradication.

Based on the place of application of individual segments of this technological solution, they can be grouped into two basic units a) measures taken in pens and b) measures taken on pasture.

5. MEASURES TAKEN ON FARMS

In herds in which the presence of parasitic infections was determined or for the purpose of regular control for the presence of parasites, the following measures were applied:

5.1. STRICT OBSERVANCE OF BIOSAFETY AND ZOO TECHNICAL MEASURES

Biosecurity measures aim to improve the profitability of production, prevent unwanted situations and enable effective prevention of infectious diseases. These

are general measures related to the correct choice of location for the construction of facilities, the structure and functionality of the facility and infrastructure on farms, as well as zootechnical measures in the production chain. They include the selection of the grazing site as well as the holding technology.

Apart from these measures, biosecurity measures related to the health control of newly acquired animals and prevention of contact between different age categories are also very important.

Internal biosecurity measures are defined in biosecurity protocols on farms, through sanitation plans that are continuously implemented. A sanitary procedure plan is made individually for each facility, depending on the facility's capacity, construction and technical characteristics, and type of production.

Zootechnical measures and their proper application are the next measure in preventing the introduction and spread of infection in herds. As part of this program, an inter-round break, i.e. the so-called "facility rest". Appropriate cleaning equipment was used in each facility, which was not allowed to be used in other facilities.

In cases of persistent infection, a system of daily fertilization is applied with adequate transportation and disposal of manure.

5.2. PRODUCTION PROCESS MANAGEMENT

Sheep are raised in farm conditions during the winter and on pasture during most of the year. For these reasons, attention must be paid to each of the mentioned aspects of this production. The most important moment for the occurrence of coccidiosis is the keeping of sheep in farm facilities.

5.3. PRODUCTION PROCESS ON SHEEP FARMS

5.3.1. Construction and types of objects

Building a sheep farm means meeting the conditions and regulations stipulated by the law, on the one hand, but also creating opportunities for the proper implementation of all production processes, which result from the work program, on the other hand.

Since a sheep farm in the narrower sense means facilities and equipment, to this end it is necessary that each farm includes the following:

- Facility for accommodation of the planned number of sheep with appropriate young, as well as for breeding males;
- Facilities for milking, reception and processing of milk if it is a milk production farm;

- Facilities for housing animal feed;
- Facilities for machines and mechanization;
- Adequate equipment in built facilities.

The sheep facility must provide good living conditions for all categories and the smooth performance of all work processes, from insemination of sheep, monitoring of pregnant ewe, reduction of losses during lambing, rearing of young, to nutrition, selection, milking, shearing and implementation of other measures on which success in sustainable sheep farming depends.

Starting from the mentioned principles, when building a sheepfold, it is necessary to comply with the following criteria:

- The building must face southeast or southwest;
- The location should be in a dry and draining place, sheltered from strong winds;
- Proper lighting through windows, as well as with electricity;
- The temperature in the facility during the winter should be around 6°C for adult animals, and for young 10-12°C; and in the summer months it must not be above 27°C;
- Relative air humidity should range from 80-70%;

5.3.2. General hygiene measures

General hygiene measures are carried out regularly before entering and after leaving the animals from the facilities on the farm. They begin with mechanical cleaning, which aims to remove visible dirt from all surfaces in the facility. When cleaning, it is necessary to wet the surface beforehand so that no dust is raised during cleaning. After finishing the cleaning of the building, all roads inside the economic yard of the farm are cleaned.

The next stage is sanitary washing, which removes the rest of the dirt, and this is done with water whose temperature exceeds 60°C. Sanitary washing should be carried out particularly thoroughly on floors, lower parts of walls and boxes in stables, work surfaces, etc.

5.3.3. Disinfection

Disinfection of buildings is divided into ongoing disinfection, disinfection that is done after eviction and before re-occupation of buildings and sanitary disinfection that is carried out in the event of an outbreak of disease on the farm.

Disinfection is carried out with mildly toxic and non-corrosive disinfectants (most often quaternary ammoniums), which are used to treat equipment in the facility and milking equipment.

In case of disease, sanitary disinfection is applied. In doing so, the sick animals are separated from the healthy ones and both groups are moved out of the facility. After general hygiene measures, disinfection is carried out. Ammonia-based disinfectants destroy coccidia oocysts and are used for floor mats (straw). Other surfaces are treated with a 2% solution of NaOH in warm water of at least 70°C.

5.3.4. Rodentization and disinsection

Rodent control is one of the basic measures of zoohygiene protocols. In addition to the application of chemical rodenticides, it is good if construction and technical measures are taken in order to reduce the entry of rodents into farm buildings.

Disinsection of buildings should be carried out continuously, bearing in mind the presence of a large population of insects, primarily flies, in the buildings themselves and in the immediate surroundings. Hygienic and protective measures should be used on the farm, first of all, proper storage of manure, installation of protective nets on windows and ventilation openings, insect traps, electric UV electrocutor lamps, and, if necessary, the use of chemical agents (adulticides and larvicides).

5.3.5. Control of birds and stray dogs and cats

Control of birds found on farms and on individual holdings with a large number of animals (pigeons, sparrows, starlings, swallows, crows, magpies, etc.) must be rigorously implemented, considering that they can be carriers of infectious agents (tuberculosis, salmonellosis, ornithosis, pastereiosis etc.). Therefore, it is recommended to install nets on windows and ventilation openings, close silo openings and remove places suitable for making nests and holding birds, as well as spikes to prevent birds from landing. Chemical treatment with corvicide is the option of last resort.

The presence of stray animals, dogs and cats, is a frequent occurrence on a large number of farms. These animal species should be denied access to farm facilities, considering that dogs are carriers of many zoonotic parasites, most often tapeworms, the most important of which are *Echinococcus granulosus*, *Taenia multiceps*, *T. hydatigena*, *T. serialis* and others whose cysts are found in the organs or brains of infected sheep, and certain species such as *E. granulosus* and *T. multiceps* are zoonotic parasites. Dogs can also transmit *Cryptosporidium* sp. to sheep and *Giardia intestinalis* which are zoonotic

protozoa. Cats are carriers of toxoplasmosis, one of the most pathogenic protozoan zoonoses *Toxoplasma gondii* that affect mammals and birds, and human infections are caused by the consumption of unheated meat and milk from infected animals.

5.3.6. Removal of dead animal carcasses

Removal of carcasses of dead animals from production facilities is the responsibility of employed workers. During the construction of the farm, space is planned for burial pits and an animal cemetery. On better farms, there are built cooling chambers or containers for collecting carcasses from the farm, i.e. all materials that belong to category 1. Their removal is carried out according to a weekly plan, and it is better to process the carcasses in rendering plants, where it is necessary for each farm to have a signed contract with the rendering plant for the removal of category 1 materials. In this way, the risk that the corpses of dead animals are a source of various infections for healthy sheep is reduced.

5.3.7. Removal of manure

The sheep are kept on a deep mat in the barns. In such facilities, manure is formed on the entire surface of the floor and is usually removed twice a year. Manure disposal within the farm must be in drained places, at least 50 m away from buildings. Application of biological degradation of manure (burning of manure) is considered desirable and is very important for raising the level of biosecurity on the farm. The use of manure originating from small ruminant farms, for the purposes of fertilizing agricultural areas, represents a significant risk to the health of animals as well as human health if the manure is not adequately treated by lying down. Research in the world and in our country has shown that the presence of *Eimeria* sp., *Cryptosporidium* sp. oocysts can be found in soil and sediment, and various types of pathogenic bacteria including *Salmonella* sp. and *Staphylococcus aureus*.

6. MEASURES TAKEN ON PASTURE

6.1. PASTURE

A pasture is an area of land that is used for feeding and raising livestock by grazing. Depending on the altitude, it can be mountain or lowland pasture. They are important sources of fodder for the production of green mass for grazing and making hay, and more and more for the production of quality silage and haylage, especially in hilly and mountainous areas. Besides the obvious importance of pastures, they are also the site of constant parasitic infections of small ruminants. There are many factors that

contribute to the occurrence, maintenance and spread of parasitosis in one pasture. Among them are: joint keeping of animals of different old categories, joint keeping of animals of different owners on the same pastures and, as the most important, favorable climatic conditions that are necessary for the development and survival of preparatory stages and transitional hosts of parasites in the external environment. The conditions required for the development of certain types of parasites vary and are reflected in their seasonal distribution from year to year.

6.2. PROPER USE OF PASTURE

The population pressure on the pasture (number of animals per unit area) and the method of grazing - whether it is forced or stationary also affect the load on the pasture and the degree of its infection. That is why one of the solutions that is successfully used in the form of grazing - with this type of infection, the best solution is persecution grazing.

When lambs are kept on grass, these areas must not be overcrowded and they need watering places located in well-drained areas. Shelters must be kept clean and have dry, well-laid floors. The grass in the pens should be kept for a long time in order for the kid/kid to develop immunity through low exposure to coccidia oocysts.

Peregrine grazing is a method of using pastures in which animals are moved from one part of the pasture to another at intervals and returned to them only after a certain period of rest. Usually, persecutions are carried out after 5-7 days, so that in 2-3 months the animals return to the initial location. The cleanest part of the pasture should be used for young animals, which is achieved by grazing them in front of older animals. In some places, this is solved by making movable fences that can also be used to block places where grazing is not desirable (next to ponds, etc.).

6.3. ERADICATION OF PASTURES

Permanent pastures pose the greatest health risk for sheep, especially if they have been used unplanned for many years. The cultivation of pastures directly depends on the geological and pedological composition of the soil, hydrological conditions (standing and running water) and microclimatic conditions. The main goal of cultivation is to obtain a pasture that contains a minimum of infectious agents in the soil, which is maximally free from vectors of certain diseases (molluscs, arthropods), infectious forms of parasites and other infectious agents that can be found on the grass.

The earlier opinion that infectious agents are destroyed by plowing permanent pastures is refuted by the fact that in this way (ploughing) certain parasites are only

successfully protected from unfavorable external conditions - direct insolation, drying, showers, frost, etc. Without the use of certain disinfectants and artificial fertilization, the primary effect of this measure is short-lived. Any correction of the pasture after leveling the quantity and quality of the soil is carried out through the floristic composition of the plant mass and the application of manure, which must be adequately prepared.

7. HEALTH PROTECTION

By making an analogy with the health condition of small ruminants in the surrounding countries, where this production is on the rise, an indicator of the epizootiological and epidemiological situation can be extracted, which has not been analyzed in detail until now. Knowledge of the correlation between microclimatic conditions and disease vectors - high-altitude pastures, the presence of floodplains, the absence of any land reclamation and cultivation of pastures, etc. indicates the presence of several diseases that we will list here. Most of them have a zoonotic character, so they represent a serious health problem in case of occurrence.

By looking at the epizootic situation and the movement of infectious and parasitic diseases of sheep in our country, it is possible to single out diseases of viral, bacterial and parasitic etiology that are most often present and the control measures required for their suppression and control.

7.1. PARASITOLOGICAL DIAGNOSTICS

Regular parasitological examinations must be included in regular preventive health care measures for sheep. Timely detection of parasitic infections and targeted therapy are the basic measure of successful suppression of parasitic infections both on pasture and during the winter stay in the pens, and thus the achievement of better production results.

Preventive coprological diagnostics should include all age categories of animals and is performed at least three times a year in all age and production categories. Breeding animals, if they are positive, should be dewormed and treated with acaricides before conception and, if necessary, before parturition.

We must perform a parasitological examination of the decided lambs before taking them out to pasture and treat them if necessary. For fattening animals and breeding cows that are on pasture and in pens, the same principles apply - regular and periodic controls. Also, newly acquired breeding animals must undergo parasitological control twice during their stay in quarantine.

Coprological examinations in sheep are performed using the methods of Patakij, Berman, McMaster, as well as the modified method of Whitlook. To assess the degree of infection, we used the subjective method of descriptive description according to McMaster. Determination of oocysts is done morphometrically according to the keys given by Soulsby.

In all cases of a positive finding, parasite control must be carried out in all animals.

7.2. APPLICATION OF ANTIPARASITIC DRUGS

During drug therapy, we expel the parasites from the animal's digestive tract, so after the therapy, which is carried out in the pens, we have to remove the parasites together with the garbage. Antiparasitics are administered through food and water.

- Coccidiosis therapy

In our experiment, after diagnosing parasitic infections with *Eimeria* sp. all animals in the herd were treated with Toltrazuril-la (20 mg/kg, PO, once), whose metabolite is toltrazuril-sulfone (ponazuril), which significantly reduces the number of cysts.

- Coccidiosis prevention

The occurrence of coccidiosis caused by *Eimeria* sp. under many management systems it is predictable, so it may be necessary to administer prophylactic coccidiostats in feed or soluble coccidiostats for 28 consecutive days, starting a few days after lambs are introduced to the suspected environment. However, this does not mean that other appropriate corrective changes in management should not be sought and introduced. Sulfonamides can be added to drinking water as a treatment, but are not FDA approved for this purpose. In our case, it was used for preventive purposes before being driven out to pasture and before returning to the stables *Toltrazuril* (20 mg/kg, PO, one-time).

- Cryptosporidiosis therapy

In case of cryptosporidiosis is no specific ovine treatment measures are available at present, only the symptoms can be treated, by keeping lambs warm and giving rehydration therapy. The application of *Toltrazuril* (20 mg/kg, PO, one-time).also showed a satisfactory effect.

- Cryptosporidium prevention

In general, the required levels of chlorine preclude the use of chlorine disinfection as a reliable method to control *Cryptosporidium* in drinking water.

7.3. HYGIENE MEASURES DURING AND AFTER THERAPY

All clinically affected lambs should be separated from their mothers and placed in a clean, disinfected pen with plenty of straw. Other animals should be moved to less contaminated areas of the facility to ensure that food and water sources are free of feces.

Controlling the management of coccidiosis is a delicate balance between ensuring that lambs are exposed to the infection and thus acquire immunity and preventing their development and causing the onset of clinical disease. Management plays a key role in prevention by ensuring that all areas used by sheep, especially lambs, are thoroughly cleaned and disinfected, that pens are not overcrowded, and that kids are kept in small groups of the same age. The number of individuals in the facility is reduced, and thus fecal contamination. All feed and water troughs should be raised off the ground and placed in well-drained areas. By regularly moving the lambs to other segments of the facility, excessive accumulation of oocysts is prevented and the potential infectious dose is reduced.

8. EDUCATIVE PROGRAM

The training of veterinarians who provide health care for small ruminants was carried out during each visit to the stations, as part of the contractual cooperation. Special emphasis is placed on the application of good veterinary practice. In this way, a contribution was made to preventing the spread of infection, but also educated veterinarians on how to protect themselves from balantidiosis and cryptosporidiosis, which in some countries have the status of professional diseases.

9. RESULTS OF TAKEN MEASURES AND CONCLUDING CONSIDERATIONS

For the purpose of quantifying coccidiosis control measures applied to flocks of sheep in pens and on pasture, which were implemented starting from 2014 to 2018, and were carried out by the competent veterinary stations, parasitological examinations of the flock were carried out.

9.1. CONTROL PARASITOLOGICAL EXAMINATIONS OF THE HERD

- Number and type of sample

In order to establish the prevalence of coccidiosis and the biodiversity of the causative agent in the studied herds of sheep and goats, samples of feces of all categories of animals were collected. On each of the farms, 30 samples of feces were sampled,

10 from each production category - suckling lambs (from 0 to 28 days of age), rearing animals (before the first mating) and adult sheep (breeding animals).

-Methods of examination

Coprological examinations were performed using the methods of Patakij, Stoll and McMaster as well as the modified method of Whitlock and Euzeby. To assess the infection, we used the subjective method of descriptive description according to McMaster, in accordance with the recommendations of WFP-EFP, WHO, FAO and OIE. All parasites were determined on the basis of morphological characteristics, according to the keys given by Soulsby.

- Intervals of examination

1. The first control parasitological examination was carried out in the winter months during the stay of animals in closed buildings, when coccidiosis occurs most often.
2. The second examination was performed after the application of preventive therapy before the expulsion to the pasture.
3. The third inspection was done three months later during the grazing season.
4. The fourth inspection was done before the withdrawal of the animals into the pens when the second preventive treatment was done.
5. The fifth parasitological examination was performed after one month of the animals' stay in the stables.

9.2. RESULTS OF CONDUCTED RESEARCH

At the beginning of the implementation of the program, the prevalence of parasitic infections in the tested herds was as follows:

Our first examination revealed coccidiosis in 139 animals (23.61%). Infection was most common in lambs (less than 3 months old), sheep aged 3 months to 1 year, and adult sheep (1 year or older).

Lambs most often showed clinical symptoms of the disease and they were present in 39.37% of the affected individuals. There was no gender difference in the prevalence and incidence of coccidiosis.

In sheep between the ages of 3 months and 1 year, rearing animals (before the first admission) 51.47% were infected with coccidia in a subclinical scale, with the fact that there was no gender difference in the prevalence and incidence of coccidiosis.

In adult animals, the results showed that 57.70% of sheep were infected and had subclinical coccidiosis. Adult female sheep were significantly ($p<0.05$) more infected (82.2%) than adult rams (40%).

The most abundant species of *Eimeria* in lambs was *E. ovoidalis*, while in sheep aged from 3 months to 1 year and adult sheep, *E. ovina* was the most common.

In the overall findings, *E. ovoidalis* was the most abundant species, found with 87.1%, followed by *E. faueri* (63%), *E. ovina* (53%), *E. granulosa* (31%), *E. parva*, (25%), *E. intricata* (19%) and *E. pallida* (8%), Infections with two or more *Eimeria* species were detected in 78%.

- First parasitological examination

The total number of excreted oocysts in lambs was 95763+/-61283 OPG, while in sheep aged from 3 months to 1 year it was 34951+/-33237 OPG and in adult sheep 39799+/-31117 OPG. This is explained by the acquired immunity of sheep that arises after each infection, and that is why in adult animals we have a rarely manifested clinical picture of the disease, but they are constant transmitters of the infection to younger animals.

All animals were treated with a dose of Toltrazuril (20 mg/kg, PO, once).

- The second parasitological examination after the application of preventive therapy before the expulsion to the pasture

The total number of excreted oocysts in lambs was 58827+/-45675 oocysts per gram of faeces (OPG), while in sheep aged 3 months to 1 year it was 23961+/-21019 OPG and in adult sheep 19015+/-16989 OPG.

All animals were treated with a dose of Toltrazuril (20 mg/kg, PO, once)..

- The third parasitological examination was done three months later during the grazing season

The total number of excreted oocysts in lambs was 69898+/-51778 OPG, while in sheep aged from 3 months to 1 year it was 37654+/-33458 OPG and in adult sheep 21674+/-18678 OPG.

- The fourth parasitological examination before withdrawing the animals to the pens after the second treatment

Before retiring to the barn, all animals received preventive treatment with Toltrazuril (20 mg/kg, PO, once).

The total number of excreted oocysts in lambs was 12594+/- 11118 OPG, while in sheep aged from 3 months to 1 year it was 11256+/-10927 OPG and in adult sheep 9796+/-8217 OPG.

- The fifth parasitological examination after a month of the animals staying in the barn

The total number of excreted oocysts in lambs was 11892+/- 10584 OPG, while in sheep aged 3 months to 1 year it was 10017+/-9747 OPG and in adult sheep 9799+/-8217 OPG.

Tables 1, 2 and 3 show a reduction in the prevalence of coccidiosis after the application of the mentioned technical solution. This is illustrated graphically in picture 1, 2 and 3.

The tables show a reduction in the prevalence of coccidiosis after the application of the mentioned technical solution, and after its application we no longer had the occurrence of clinically manifest coccidiosis that was present in the lambs during the first examination, before the application of the therapy.

Based on the conducted tests, we believe that by applying comprehensive measures, starting with the measures applied in the pens on the farm, through the measures applied on the pasture, in a relatively short time they achieved a significant contribution in controlling and reducing the prevalence of coccidiosis in sheep.

Table 1. Prevalence of coccidiosis in suckling lambs (from 0 to 28 days of age) during the research period.

examination	number of oocysts per gram of faeces (OPG)		
	min	max	average
1	61283	95763	78533
2	45675	58827	52251
3	51778	69898	60838
4	11118	12594	11856
5	10584	10892	10738

Picture 1. Prevalence of coccidiosis in suckling lambs (from 0 to 28 days of age) during the research period

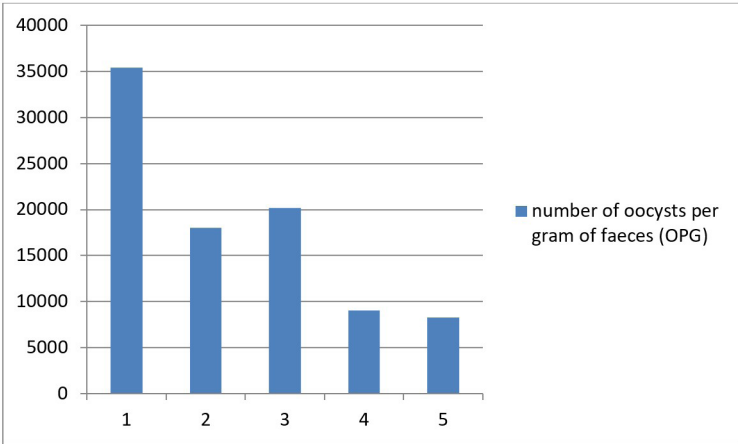


Table 2. Prevalence of coccidiosis in sheep aged from 3 months to 1 year of rearing animals during the research period.

examination	number of oocysts per gram of faeces (OPG)		
	min	max	average
1	33237	34951	34112
2	21019	23961	22490
3	33458	37654	35556
4	11928	10256	11092
5	9747	10017	9882

Picture 2. Prevalence of coccidiosis in sheep aged from 3 months to 1 year of rearing animals during the research period.

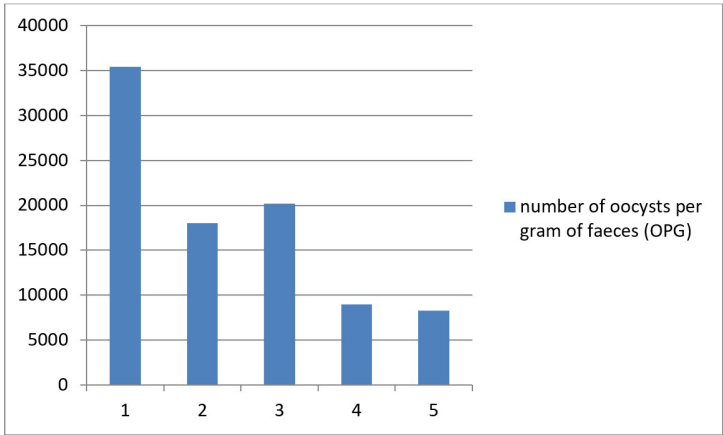
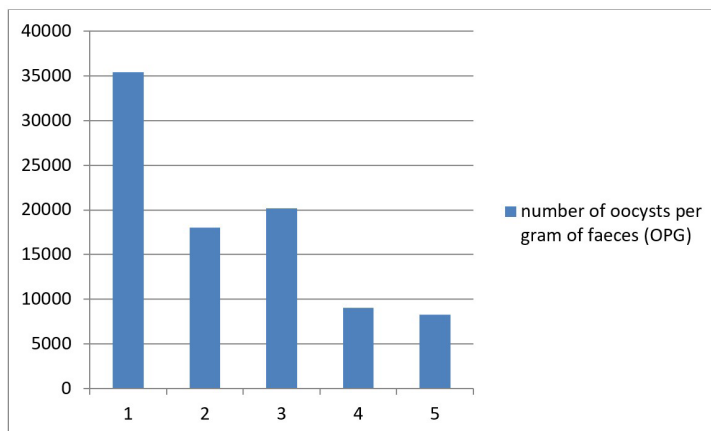


Table 3. Prevalence of coccidiosis in adult (breeding) sheep during the research period.

examination	number of oocysts per gram of faeces (OPG)		
	min	max	average
1	31117	39799	35458
2	16989	19015	18002
3	21674	18678	20176
4	9799	8217	9008
5	7738	8974	8266

Picture 3. Prevalence of coccidiosis in adult (breeding) sheep during the research period.



These measures achieved the goal of controlling coccidiosis in sheep/lambs in two ways a) by creating primary immunity in lambs after subclinical infection, which achieves lifelong immunization that prevents clinically manifest diseases and b) by preventive therapy that is used at the moment when, due to population pressure and environmental conditions, predisposing conditions for immune breakthrough and the emergence of clinically manifest infections have been created. This refers primarily to the winter period, when a critical amount of oocysts per unit area is reached in the pens and the possibility of infection. Another critical point is the stay on pasture when, due to contamination of the soil, the possibility of pasture infections is created, which was also brought under control with this program.

By cutting these points of infection, with adequate zootechnical, zoohygienic and therapeutic means, the development of natural immunity is achieved and allows coccidiosis not to appear as an obligatory infection, but to turn into a commensal infection whose presence is constantly kept under control.

Based on the obtained findings, the applied measures became part of the regular program of sheep health care in the examined herds. A special contribution to the implementation of these measures was made by fellow veterinarians, and the results achieved were a satisfaction both for them and for us, who conceived and implemented this complex coccidiosis control program.

REFERENCE

1. Adeppa J, Javaregowda AK, Krishnamurthy CM (2016) An outbreak of coccidiosis in a stall-fed sheep farm and its treatment in Shimoga Region, Karnataka. Indian Vet J 93:17–19.

2. Agyei A.D., Odonkor M., Osei-Somuah A.(2004) Concurrence of *Eimeria* and helminth parasitic infections in West African Dwarf kids in Ghana. *Small Rumin. Res.* 51 (1), 29-35.
3. El-Alfy ES, Abbas I, Al-Kappany Y, Al-Araby M, Abu-Elwafa S, Dubey JP. Prevalence of *Eimeria* species in sheep (*Ovis aries*) from Dakahlia governorate, Egypt. *J Parasit Dis.* 2020 Sep;44(3):559-573.
4. Almeida JDM (2013) Infection due to *Eimeria* spp. in sheep in the municipality of Colinas, state of Tocantins. *Med Vet (UFRPE)* 7:33–36.
5. Arslan MO, Umur S, Kara M (1999) The prevalence of coccidian species in sheep in Kars province of Turkey. *Trop Anim Health Prod* 31:161–165.
6. Ayana D, Tilahun G, Wossene A (2009) Study on *Eimeria* and *Cryptosporidium* infections in sheep and goats at Elfora export abattoir, Debre-zeit, Ethiopia. *Turk J Vet Anim Sci* 33:367–371.
7. Bakunzi FR, Thwane SN, Motsei LE, Dzoma BM (2010) Diversity and seasonal occurrence of *Eimeria* species in a mixed flock of communally reared sheep and goats in Mafikeng in the North West Province, South Africa. *J S Afr Vet Assoc* 81:148–150.
8. Balicka-Ramisz A. (1999) Studies on coccidiosis in goats in Poland. *Vet Parasitol.*81 (4), 347-349.
9. Bangoura B., Bardsley K.D., (2020) Ruminant Coccidiosis. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* 36(1):187-203. doi: 10.1016/j.cvfa.2019.12.006.PMID: 32029184.
10. Barutzki D, Marquardt S, Gothe R (1990) *Eimeria* infections of sheep in northwest Germany. *Vet Parasitol* 37:79–82.
11. Battelli G, Poglayen G (1980) *Eimeri ahsata* Honess from domestic sheep (*Ovis aries*) in Italy. *J Protozool* 27:151–152.
12. Bazalar H, Guerrero CA (1970) Coccidias en ovinos domesticos de altura com una descripcion de *Eimeria gonzalezi* n.sp. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria Lima* 22:172–180.
13. Bersissa K, Tigist T, Teshale S, Reta D, Bedru H (2011) Helminths of sheep and goats in central Oromia (Ethiopia) during the dry season. *J Anim Vet Adv* 10:1845–1849.
14. Bojkovski J., Relić R., Hristov S., Stanković B., Savić Br, Pavlović I., Petrujkić T. (2010) Influence of biological and chemical contaminants on health status of small ruminants. - *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca*, 67 (2), 37-39.
15. Carrau T, Silva LMR, Pérez D, Failing K, Martínez-Carrasco C, Macías J, Taubert A, Hermosilla C, de Ybáñez RR (2018) Associated risk factors influencing ovine *Eimeria* infections in southern Spain. *Vet Parasitol* 263:54–58.
16. Chartier C, Paraud C (2012) Coccidiosis due to *Eimeria* in sheep and goats, a review. *Small Rumin Res* 103:84–92.
17. Craig BH, Pilkington JG, Kruuk LEB, Pemberton JM (2007) Epidemiology of parasitic protozoan infections in Soay sheep (*Ovis aries* L.) on St Kilda. *Parasitology* 134:9–21.
18. da Silva NRS, Miller JE (1991) Survey of *Eimeria* spp. oocysts in feces from Louisiana State University ewes. *Vet Parasitol* 40:147–150.

19. da Silva FRC, de Souza JD, Fialho CG, Escopeli KS, de Araújo FAP (2008) Identification of *Eimeria* species in sheep in Mostardas, southern Brazil. *Vet Em Foco* 6:16–20.
20. Daniel A, Deneke Y, Ibrahim N (2014) Gastrointestinal parasites in sheep in Gemechis and Boke Districts, West Harerge Zone, Ethiopia. *Acta Parasitol Glob* 5:120–124.
21. de Macedo LO, Santos MAB, da Silva NMM, do Rêgo Barros GMM, Alves LC, Giannelli A, Ramos RAN, de Carvalho GA (2019) Morphological and epidemiological data on *Eimeria* species infecting small ruminants in Brazil. *Small Rumin Res* 171:37–41.
22. Demir S (1995) *Eimeria* species in sheep slaughtered in Bursa meat and fish plant. *Turk Parazitol Derg* 19:132–139.
23. Dunière L., Ruiz P., Lebbaoui Y., Guillot L., Bernard M., Forano E., Chaucheyras-Durand F. (2023) Effects of rearing mode on gastro-intestinal microbiota and development, immunocompetence, sanitary status and growth performance of lambs from birth to two months of age. *Anim Microbiome*. 17;5(1):34. doi: 10.1186/s42523-023-00255-7.
24. Elamin EA, Osman AY, Osman HM (2004) Coccidian infection of sheep in Khartoum-Sudan. *J Anim Vet Adv* 3:648–651.
25. Faizal A.C., Rajapakse R.P. (2001) Prevalence of coccidia and gastrointestinal nematode infections in cross bred goats in the dry areas of Sri Lanka. *Small Rumin Res*.40(3), 233-238.
26. Foreyt W.J. (1987) Coccidiosis in sheep and goats. *Vet Hum Toxicol*. 29, 60-4.
27. Foreyt W.J. (1990) Coccidiosis and cryptosporidiosis in sheep and goats *Vet Clin North Am Food Anim Pract*.6(3),655-70.
28. Ghanem MM, Abd El-Raof YM (2005) Clinical and Haemato-Biochemical studies on lamb coccidiosis and changes following amprolium and sulphadimthoxine therapy. *Benha Vet Med J* 16:286–299.
29. Gonzalez M, Sanchez A, Vazquez P (1990) Presence and dynamics of oocysts of some species of *Eimeria* in ewes and lambs during the perinatal period in Huixquilucan, Mexico. In: *Memoria III Congreso Nacional de Producción Ovina*, Tlaxcala, pp 225–228.
30. Gorski P, Niznikowski R, Strzelec E, Popielarczyk D, Gajewska A, Wedrychowicz H (2004) Prevalence of protozoan and helminth internal parasite infections in goat and sheep flocks in Poland. *Arch Fur Tierzucht* 47:43–49.
31. Gregory MW, Catchpole J, Nolan A, Hebert CN (1989) Ovine coccidiosis: studies on the pathogenicity of *Eimeria ovinoidalis* and *E. crandallis* in conventionally-reared lambs, including possible effects of passive immunity. *Dtsch Tierarztl Wochenschr* 96:287–292.
32. Gül A (2007) Prevalence of *Eimeria* species in sheep in the Bitlis province. *Turk Parazitol Derg* 31(1):20–24.
33. Gül A, Değer S (2002) The prevalence and distribution of *Eimeria* species found in sheep in Van. *Turk J Vet Anim Sci* 26:859–864.
34. Hasan MH, Abed HM (2012) A study of *Eimeria* species in sheep in Mosul city. *Iraqi J Vet Sci* 26:45–53.

35. Hashemnia M, Rezaei F, Chalechale A, Kakaei S, Gheichivand S (2014) Prevalence and intensity of *Eimeria* infection in sheep in Western Iran. *Int J Lives Res* 4:107–112.
36. Ibrahim MM, Afsa AAS (2013) Natural co-infection and species composition of *Eimeria* in sheep in Al-Baha area, Saudi Arabia. *Egypt Acad J Biol Sci* 5:49–58.
37. Islam KBMS, Taimur MJFA (2008) Helminthic and protozoan internal parasitic infections in free ranging small ruminants of Bangladesh. *Slov Vet Res* 45:67–72.
38. Jawasreh KI, Mukbel RM, Qader AA, Mayyas MA (2013) Coccidiosis in Awassi, Romanov, Charollais and Suffolk sheep breeds during the winter and summer seasons in Jordan. *Int J Appl Sci Technol* 3:10–15.
39. Jegede OC, Adejoh AA, Obeta SS, Olayemi OD (2015) Gastrointestinal parasites of sheep and goats in Gwagwalada area council, federal capital territory, Abuja, Nigeria; with a special reference to sex, breed and age. *Alex J Vet Sci* 46:170–176.
40. Jovanović D, Ilić G., Nešić D, Pavlović I., Valter D. (1991) Parazitofauna ovaca Timočkog regiona u periodu 1986-1989.godine. *Proceeding of I International Summer Conference for Advancement of Sheep and Goat Production*, Ohrid, 383-385.
41. Juszcak M, Sadowska N, Udała J (2019) Parasites of the digestive tract of sheep and goats from organic farms in Western Pomerania. *Poland Ann Parasitol* 65(3):245–250.
42. Kalef DA, Fadl SR, Abbas SM (2013) Occurrence of *Eimeria* infection of sheep from different regions of Baghdad city. *Diyala Agric Sci J* 5:32–37.
43. Kambarage DM, Kimera SI, Kusiluka LJM, Mtambo MMA (1996) Prevalence of *Eimeria* and *Cryptosporidium* oocysts in cattle, sheep and goats in Morogoro Region, Tanzania. *J Appl Anim Res* 9:73–78.
44. Kanyari PW (1993) The relationship between coccidial and helminth infections in sheep and goats in Kenya. *Vet Parasitol* 51:137–141.
45. Kareem SI, Yücel ŞY (2015) Prevalence of *Eimeria* species in sheep in Sulaimaniya province, Iraq. *J Entomol Zool Stud* 3:317–322.
46. Kaya G (2004) Prevalence of *Eimeria* species in lambs in Antakya Province. *Turk J Vet Anim Sci* 28:687–692.
47. Khan MN, Rehman T, Iqbal Z, Sajid MS, Ahmad M, Riaz M (2011) Prevalence and associated risk factors of *Eimeria* in sheep of Punjab, Pakistan. *World Acad Sci Eng Technol* 5:334–338.
48. Koinari M, Karl S, Ryan U, Lymbery AJ (2013) Infection levels of gastrointestinal parasites in sheep and goats in Papua New Guinea. *J Helminthol* 87:409–415.
49. Kyriánová IA, Vadlejš J, Langrová I (2017) Eimeriosis seasonal dynamics patterns at an organic sheep farm in the Czech Republic. *Sci Agric Bohem* 48:70–75.
50. Lassen B, Jarvis T, Mägi E (2013) Gastrointestinal parasites of sheep on Estonian Islands. *Agraarteadus J Agric Sci* 24:7–14.
51. Lopes WZ, Borges FDA, Faiolla TDP, Antunes LT, Borges DGL, Rodriguez FDS, Ferraro G, Teixeira WF, Maciel WG, Felippelli G, Costa AJD (2013) *Eimeria* species in young and adult sheep

raised under intensive and/or semi-intensive systems of a herd from Umuarama city, Parana State, Brazil. *Ciência Rural* 43:2031–2036.

52. Macrelli M, Dunnett L, Mitchell S, Carson A of the APHA Small Ruminant Species Expert Group (2019) Coccidiosis in sheep. *Vet Rec* 184:549–550.
53. Mahrt JJ (1969) Prevalence of coccidia in domestic sheep in central Alberta. *Can Vet J* 10:176–178.
54. Maingi N, Munyua WK (1994) The prevalence and intensity of infection with *Eimeria* species in sheep in Nyandarua district of Kenya. *Vet Res Commun* 18:19–25.
55. Majeed QA, Alazemi MS, Henedi AA, Tahrani L (2015) Study on parasites from farm animals in Kuwait. *J Egypt Soc Parasitol* 45:71–74.
56. Martins GF, Moura MS, Cabral DD, de Souza RR (2011) Frequência de oocisto de *Eimeria* spp. em ovinos de propriedades rurais do Município de Uberlândia-MG. *Pubvet, Londrina* 5, Art-1038.
57. McDougald L.R, Dunn W.J. (1978) Efficacy of monensin against coccidiosis in lambs. *Am J Vet Res.* 39(9), 1459-1462.
58. Michael E, Probert AJ (1970) The prevalence of coccidia in faecal samples from sheep in North Wales. *Res Vet Sci* 11:402–403.
59. Minnat TR (2014) Detection of gastrointestinal parasite infection of sheep and goats in Diyala Province-Iraq. *AL-Qadisiyah J Vet Med Sci* 13:118–123.
60. Mirzaei M, Dahmardeh E, Sharifi H (2016) The prevalence of *Eimeria* species in sheep in Zabol city, Iran. *Sci Res Iran Vet J* 11:98–105.
61. Mohamaden WI, Sallam NH, Abouelhassan EM (2018) Prevalence of *Eimeria* species among sheep and goats in Suez Governorate. *Egypt Int J Vet Sci Med* 6:65–72.
62. Molla SH, Bandyopadhyay PK (2016) Prevalence of gastro-intestinal parasites in economically important Bonpala sheep in India. *IOSR J Agric Vet Sci* 30:87–93.
63. More BV, Nikam SV, Bhamare NDS, Jaid EL (2011) Percentage prevalence of eimerian species composition of sheep and goats from beed district, Maharashtra. *Recent Res Sci Technol* 3:24–26.
64. Murthy GSS, Rao PV (2014) Prevalence of gastro-intestinal parasites in ruminants and poultry in Telangana region of Andhra Pradesh. *J Parasit Dis* 38:190–192.
65. Nešić D, Pavlović, I., Ilić G., Jovanović D., Valter D. (1991) Parazitofauna koza Timočkog regiona tokom 1990. Godine. Proceeding of I International Summer Conference for Advancement of Sheep and Goat Production, Ohrid, 397-399.
66. Norton CC, Joyner LP, Catchpole J (1974) *Eimeria weybridgensis* sp. nov. and *Eimeria ovina* from the domestic sheep. *Parasitology* 69:87–95.
67. Nourollahi-Fard SR, Khedri J, Ghashghaei O, Mohammadyari N, Sharifi H (2016) The prevalence of ovine *Eimeria* infection in Rudsar, North of Iran, (2011–2012). *J Parasit Dis* 40:954–957.

68. O'Callaghan MG, O'Donoghue PJ, Moore E (1987) Coccidia in sheep in South Australia. *Vet Parasitol* 24:175-183.
69. Om H, Kumar S, Singh P (2010) Prevalence of coccidia in Mathura region of Uttarpradesh. *Vet World* 3:503-505.
70. Owusu M, Sekyere JO, Adzitey F (2016) Prevalence and burden of gastrointestinal parasites of Djallonke sheep in Ayeduase, Kumasi, Ghana. *Vet World* 9:361-364.
71. Ozdal N, Tanritanir P, Goz Y, Deger S, Kozat S (2009) Parasitic protozoans (*Eimeria*, *Giardia*, and *Cryptosporidium*) in lambs with diarrhoea in the Van province (Turkey). *Bull Vet Inst Pulawy* 53:47-51.
72. Pavlović, I., Nešić D., Ilić G., Jovanović D., Vlatter D. (1991) Parazitofauna ovaca Timočkog regiona tokom 1990. Godine. Proceeding of I International Summer Conference for Advancement of Sheep and Goat Production, Ohrid, 387-389.
73. Pavlović I., Kulišić Z., Nešić Dragica, Romanić S. (1995): Endoparasites of sheep and goats in Prizren district Proc.3rd Internat. Conference of Sheep and Goats Production, Ohrid, Macedonia, 106-110.
74. Pavlović, I., Jakić-Dimić, D., Ivanović, S., Žujović, M. (2003) The effect of parasitic infection on sheep body weight. *Biotech.Animal Husb.* 19:145-148.
75. Pavlovic, I., Savić B., Ivetić V., Radanović O., Žutić M., Jakić-Dimić D., Bojkovski J. (2009) The effect of parasitic infections to production results of sheep Poceeding of IV Balkan Conference of Animal Science BALNIMALCON 2009, Challanges of the Balkan Animal industry and the Role of science and Cooperation, Stara Zagora, Bulgaria, 389-391.
76. Pavlović I., Anđelić-Buzadžić G. (2010) Osnovi dijagnostike parazitskih bolesti životinja za studente visoke poljoprivredne škole strukovnih studija u Šapcu studijski program: strukovna veterina. Naučni institut za veterinarstvo Srbije.
77. Pavlović I., Ivanović S., Žujović M., Tomić Z. (2010) Influence of cryptosporidiosis and coccidiosis to goat production. Proceeding of XIV International Symposium Feed Technology, XII International Symposium NODA, Novi Sad, 192-195.
78. Pavlović I., Anđelić-Buzadžić G. (2011) Parazitske bolesti sa osnovama parazitologije. Visoka poljoprivredna škola strukovnih studija u Šapcu.
79. Pavlović I., Ivanović S., Žujović M., Tomić Z., Memiši N. (2011) Endoparasites of goats in spread Belgrade area in period 2009-2010. VTH international conference: BALNIMALCON 2011 & Xth International Symposium of Animal Biology and Nutrition & 40th International Session of Scientific Communications of the Faculty of Animal Science, Bucharest, Romania; Proceeding 1-4.
80. Pavlović I., Ivanovic S., Žujović M., Tomić Z., Memiši N. (2012) Studies on the endoparasites of goats in spread Belgrade area in period 2009-2010. *Arc. Zootechnica* 15(4), 27-31.
81. Pavlović I., Ivanović S., Bojkovski J., Kulišić Z., Savić B., Tambur Z. (2013) Eimeriosis of small ruminants in Belgrade area. Proceeding of XIII Middle European Buiatrics Congress, Belgrade, 480- 483.
82. Pavlović I., Stokić Nikolić S., Dobrosavljević I., Ilić Z. (2013) Parasites fauna of goat at new established farm inhabit with gogas originated from warios area in Serbia. 3rd International Epizootiology Days and XV Serbian Epizootiology Days, Niška Banja, Proceeding 241-242.

83. Pavlović I., Jovičić D., Žugić G., Jovčevski S., Ivanović S., Stanojević-Momčilović V., Bojkovski J (2014) Collection of papers Zoohygienic treatment of pastures in order to prevent parasitic infections of small ruminants. XXV Consulting on disinfection, disinsection and pest control - one world, one health - with international participation, Kovačica, Serbia, 59-63.
84. Pavlović I., Ivanović S. (2017) Parasitic infections of small ruminants. 2nd International Symposium Collection of Lectures Health care and reproduction of ungulates, Belgrade, Serbia, 37-46.
85. Pavlović I., Rogožarski D. (2017) Parasitic diseases of domestic animals with basics of parasitology and diagnostics of parasitic diseases. Scientific KMD, Belgrade, Serbia.
86. Pavlović I., Hadžić I., Ivanović S., Petrović P. M., Caro- Petrović V., Ružić-Muslić D., Bojkovski J. (2018) The importance of proper grazing and eradication of pastures in the prevention of parasitic infections of small ruminants. Proceedings Scientific expert meeting Sustainable primary agricultural production in Serbia - state, possibilities, limitations and chances, Bačka Topola, Serbia, 115-121.
87. Pavlović I., Ivanović S., Hadžić I., Petrović P.M., Caro Petrović V., Bojkovski J., Pavlović M., Zvekić D.(2019) Health protection of small ruminants in semi-intensive production. - Proceedings, National scientific meeting with international participation Sustainable agricultural production - the role of agriculture in environmental protection, Bačka Topola, Serbia, 165-172.
88. Pavlović I., Caro-Petrović V., Csordás F., Minić S., Zdravković N., Bojkovski J., Stefanović V. (2021) Coccidiosis in lambs in northern Serbia (Vojvodina). Proceeding of 3rd International Symposium: Modern Trends in Agricultural Production Rural Development and Environmental Protection, Vrnjacka Banja, Serbia, 342-347.
89. Pavlović, I., Radović, B., Milanović, V., Caro-Petrović, V., Bojkovski, J., Relić, R., Mladenović, V., Zdravković, N., Becskei, Z (2021) Protosan infection of small ruminants in north part of Serbia, with emphasis to North Kosovo. *Lucrări Științ. Med.Vet. Timișoara*, LIV (3):125-133.
90. Pavlović, I., Ivanović S (2022) Goats from pastures to table. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany.
91. Pavlovic I., Bojkovski J., Caro-Petrovic V., Tasić A., Pavlovic M. (2023) Coccidiosis of sheep in Serbia. Proceeding of 1. Bilisel International Gordion Scientific Research Congress, Ankara,Turkey, 683-684.
92. Pavlovic I., Bojkovski J., Caro-Petrovic V., Tasic A., Pavlović M., Zdravkovic N., Mederle N. (2023) Control of coccidiosis of farm breeding sheep. *Sci.Papers J.66 (1), Veterinary Series*, 77-80
93. Pavlovic I., Bojkovski J., Caro-Petrovic V., Mederle N., Zdravkovic N., Pavlović M., Tasic A. (2023) Biosecurity measures in the control of gastrointestinal parasitic infections of sheep in pasture. Book of Abstract Multidisciplinary Conference on Sustainable Development, Section: Veterinary Medicine, Timișoara, Romania, 38.
94. Pavlovic I., Caro-Petrovic V., Tasic A., Pavlovic M. (2023) Coccidiosis of sheep in sout part of Serbia. Proceeding Book VI. International Ankara Multidisciplinary Studies Congress, 13-Ankara, Turkiye, 51.
95. Pavlovic I., Bojkovski J., Caro-Petrovic V., Tasic A., Pavlović M., Zdravkovic N., Mederle N. (2023) Control of coccidiosis of farm breeding sheep. Congress Program and Abstract Life Sciences Today for Tomorrow, Iasi, Romania, 172.

96. Pavlovic I. (2023) Coccidiosis of sheep in northeast part of Serbia. Congress Book vol 1. of 1. Bilisel International Turabdin Scientific Researches and Innovation Congress, Mardin, Turkiye, 584.
97. Pavlovic I., Karapetkovska-Hristova V. (2024) The importance of correct pasture breeding in the prevention of infections in sheeps. Congress Book 2. Bilisel International Korykos Scientific Researches and Innovation Congress, Mersin, Turkiye, 595.
98. Petrović P.M., Ilić Z., Caro Petrović V., Pavlović I. (2021) Successful and profitable sheep breeding Russian Academy of Natural Sciences, Balkan Scientific Center, Belgrade.
99. Platzer B, Prosl H, Cieslicki M, Joachim A (2005) Epidemiology of *Eimeria* infections in an Austrian milking sheep flock and control with diclazuril. *Vet Parasitol* 129:1–9
100. Raue K, Heuer L, Böhm C, Wolken S, Epe C, Strube C (2017) 10-year parasitological examination results (2003 to 2012) of faecal samples from horses, ruminants, pigs, dogs, cats, rabbits and hedgehogs. *Parasitol Res* 116(12):3315–3330.
101. Reginsson K, Richter SH (1997) Coccidia of the genus *Eimeria* in sheep in Iceland. *Icel Agric Sci* 11:99–106.
102. Shah HL (1963) Coccidia (Protozoa: Eimeriidae) of domestic sheep in the United States, with descriptions of the sporulated oocysts of six species. *J Parasitol* 49:799–807.
103. Silva RMD, Facury-Filho EJ, Souza MF, Ribeiro MFB (2011) Natural infection by *Eimeria* spp. in a cohort of lambs raised extensively in Northeast Brazil. *Rev Brasil Parasitol Vet* 20:134–139.
104. Skirnisson KARL (2007) *Eimeria* spp. (Coccidia, Protozoa) infections in a flock of sheep in Iceland: species composition and seasonal abundance. *Icel Agric Sci* 20:73–80.
105. Smith WN, Davis LR (1961) Two species of sheep coccidia new to Alabama. *Proc Helminthol Soc Wash* 28:95–96.
106. Sontakke TA, Kanse VS, Bansode VK, Lokahnde SC, Nikam SV (2015) Occurrence of coccidian parasites in sheep in Omerga region. *Int J Life Sci* A3:92–94.
107. Soulsby E.J.L. (1977) Helminths, arthropods and protozoa of domesticated animals, and Cassell Co, London.
108. Squire SA, Robertson ID, Yang R, Ayi I, Ryan U (2019) Prevalence and risk factors associated with gastrointestinal parasites in ruminant livestock in the Coastal Savannah zone of Ghana. *Acta Trop* 199:105126.
109. Sultan K, Elmonir W, Hegazy Y (2016) Gastrointestinal parasites of sheep in Kafrelsheikh governorate, Egypt: prevalence, control and public health implications. *Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci* 5:79–84.
110. Swarnkar CP, Singh D, Solanki VK (2010) Prevalence of gastrointestinal parasites of sheep in semi-arid Rajasthan: a field study. *Indian J Small Rumin* 16:221–227.
111. Šarić T, Beck R, Bosnić S, Župan I, Šaran T, Aćimov D, Tkalčić S (2015) Species identification and prevalence of *Eimeria* spp. coccidial parasites in sheep from the North Dalmatia (Croatia). In: Proceedings of XXII international congress of mediterranean federation for health and production of ruminants, pp 351–354.

112. Tavassoli M, Khoshvaghti H (2010) Helminthes and coccidia infection of wild sheep (*Ovis ammon Orientalis*) in Kabodan Island of National Park of Urmia Lake. Iran Vet Res Forum 1:26–29.
113. Taylor M.A., Catchpole J. (1994) Review article: coccidiosis of domestic ruminants. Appl Parasitol. 35(2):73–86.
114. Toulah FH (2007) Prevalence and comparative morphological study of four *Eimeria* sp. of sheep in Jeddah area. Saudi Arabia J Biol Sci 7:413–416.
115. Trejo-Huitrón G, Bautista-Gómez LG, Martínez-Castañeda JS, Romero-Núñez C, Trejo-Castro L, Espinosa-Ayala E (2020) Morphological characterization and first molecular identification of the eleven *Eimeria* species that infect sheep from Mexico. Parasitol Res 119:115–122.
116. Uhazy LS, Mahrt JL, Holmes JC (1971) Coccidia of rocky mountain bighorn sheep in western Canada. Can J Zool 49:1461–1464.
117. Varghese T, Yayabu R (1985) Ovine coccidia in Papua New Guinea. Vet Parasitol 17:181–191.
118. Vasilková Z, Krupicer I, Legáth J, Kovalkovicova N, Petko B (2004) Coccidiosis of small ruminants in various regions of Slovakia. Acta Parasitol 49:272–275.
119. Vázquez MB, Genzelis M, Mijalenko S, Beltramino JB (2014) Survey of *Eimeria* spp. in sheep: first notice of *Eimeria macusaniensis* in the region of Governor Gregores, Santa Cruz. Argent Revista de Salud Anim 36:62–64.
120. Wang CR, Xiao JY, Chen AH, Chen J, Wang Y, Gao JF, Zhu XQ (2010) Prevalence of coccidial infection in sheep and goats in northeastern China. Vet Parasitol 174:213–217.
121. William J. F. (1990) Coccidiosis and Cryptosporidiosis in Sheep and Goats Veterinary Clinics of North America. Food Anim. Practice 6 (3),655–670
122. Yakhchali M, Golami E (2008) *Eimeria* infection (Coccidia: Eimeriidae) in sheep of different age groups in Sanandaj city, Iran. Veterinarski arhiv 78:57–64.
123. Yakhchali M, Rezaei AA (2010) The prevalence and intensity of *Eimeria* spp. infection in sheep of Malayer suburb, Iran. Arch Razi Inst 65:27–32.
124. Yang R, Jacobson C, Gardner G, Carmichael I, Campbell AJ, Ryan U (2014) Longitudinal prevalence, oocyst shedding and molecular characterisation of *Eimeria* species in sheep across four states in Australia. Exp Parasitol 145:14–21.
125. Zainalabidin FA, Raimy N, Yaacob MH, Musbah A, Bathmanaban P, Ismail EA, Mamat ZC, Zahari Z, Ismail MI, Panchadcharam C (2015) The prevalence of parasitic infestation of small ruminant farms in Perak, Malaysia. Trop Life Sci Res 26:1–8.

CAPÍTULO 5

DETERMINACIÓN ANALÍTICA DEL NÚMERO DE INTERVALOS DE CLASES DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES

Data de submissão: 17/07/2025

Data de aceite: 25/07/2025

José German Flores-Garnica

Instituto Nacional de
Investigaciones Forestales
Agrícolas y Pecuarias
Campo Experimental
Centro Altos de Jalisco

Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México
<https://orcid.org/0000-0002-8295-1744>

RESUMEN: La dimensión y distribución de los incendios forestales en México complica su atención, tanto desde la perspectiva de prevención como de combate, por lo que se hace necesario la ubicación de áreas prioritarias de atención, con base a ciertos criterios, como el riesgo de incendio. Esta información se presenta en cartografía temática específica; cuya clasificación implica: a) selección del número de clases de riesgo; y b) proceso para establecer los intervalos de clases. No obstante, generalmente este proceso se hace en forma subjetiva, dependiendo de la persona que especifica el método de clasificación. Para definir un proceso objetivo, soportado estadísticamente, se hace un análisis comparativo entre grupos de clases de riesgo de incendio (3 y 5), para lo cual se evaluaron los siguientes criterios de división

de intervalos de clases: Intervalos iguales; Cuantiles; Rupturas naturales; e Intervalos geométricos. En esta evaluación, se usó un mapa de riesgo de incendios forestales del estado de Jalisco (México), en el cual, para definir el número de clases y el método para establecer los intervalos, se ubicaron al azar 1 000 sitios de validación (SV). Alrededor de estos sitios se delimitó una superficie de 100 km², dentro de los cuales se contó el número de incendios forestales, dentro del periodo 2005-2014. Posteriormente, se asoció la clase de riesgo que correspondía a cada uno de los SV con el número de incendios ubicados en el área de 100 km². A partir de esto, se comparó la variabilidad (desviación estándar) entre las clases generadas por cada uno de los cuatro métodos para definir sus intervalos. Los resultados sugieren que, para las condiciones del estudio, el método de intervalos iguales (II) es el más indicado para definir los intervalos de clase de riesgo de incendios. Referente al número de clases, existe una más clara diferenciación, entre las clases, al usar cinco clases.

PALABRAS CLAVE: intervalo equivalente; intervalo geométrico; intervalos iguales; intervalos de progresión; rupturas naturales.

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIATIONS IN FIRE BEHAVIOR DURING A PRESCRIBED BURN

ABSTRACT: The dimension and distribution of forest fires in Mexico complicates their

attention, both from the perspective of prevention and combat, making it necessary to locate priority areas for attention, based on certain criteria, such as fire risk. This information is presented in specific thematic cartography; whose classification implies: a) selection of the number of risk classes; and b) process to establish the class intervals. However, generally, this process is subjective, depending on the person who specifies the classification method. In order to define an objective process, supported statistically, a comparative analysis is made between groups of fire risk classes (3 and 5), for which the following criteria for dividing class intervals were evaluated: Equal intervals; Quantiles; Natural breaks; and Geometric intervals. In this assessment, a forest fire risk map of the state of Jalisco (Mexico) was used, in which, to define the number of classes and the method to establish the intervals, 1,000 validation sites (VS) were randomly located. Around these sites, an area of 100 km² was delimited, within which the number of forest fires was counted, within the period 2005-2014. Subsequently, the risk class that corresponded to each of the VS's was associated with the number of fires located in the 100 km² area. From this, the variability (standard deviation) between the classes generated by each of the four methods was compared to define their intervals. The results suggest that, for the conditions of the study, the method of equal intervals (II) is the most suitable for defining the fire risk class intervals. Regarding the number of classes, there is a clearer differentiation among the classes when using five classes.

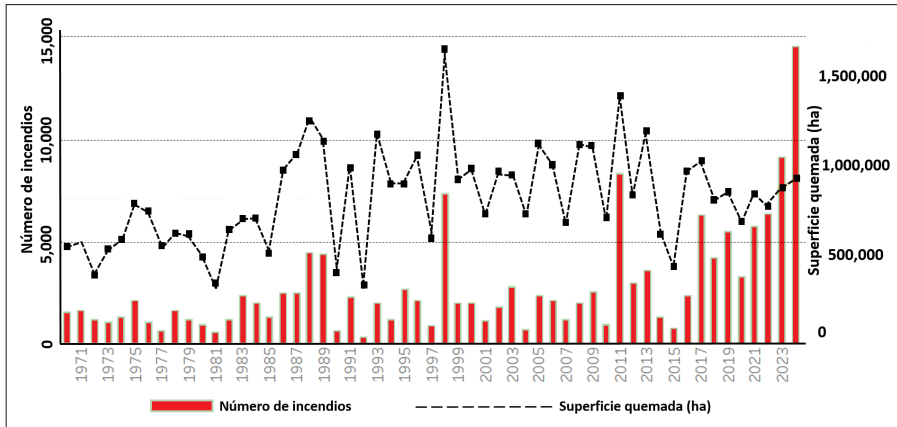
KEYWORDS: equivalent interval; geometrical interval; equal intervals; progression intervals; natural breaks.

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales en México son impactados todos los años por la ocurrencia de incendios (Figura 1), por ejemplo, durante el periodo 20019-2023 se contabilizaron en promedio 7 097 incendios, que afectan 319 003 ha por año (Conafor, 2025). Lo anterior implica que se deben establecer estrategias de prevención y combate de incendios forestales (Calkin *et al.*, 2014). Sin embargo, debido a que los recursos (económicos y humanos) disponibles son limitados, es necesario priorizar las áreas de atención (Conafor, 2010; Mildrexler *et al.*, 2016), las cuales pueden ubicarse y dimensionarse mediante cartografía temática específica (de la Riva *et al.*, 2004). La generación de esta cartografía se apoya en varios criterios, como el riesgo (Kuter *et al.*, 2011; Mohammadi *et al.*, 2014; Salvati y Ferrara, 2015) y el peligro de incendios forestales (Magaña y Romahn, 1987; Rojo *et al.*, 2001). Sin embargo, los estudios de riesgo de incendios en México son escasos (Villers y López, 2004; Vega Nieva *et al.*, 2018), ya que la definición de criterios implica integrar, cartográficamente, una gran cantidad de información (Carrillo *et al.*, 2012), como la ocurrencia de incendios (Ávila *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2013; Pan *et al.*, 2016); cercanía a caminos (de Torres *et al.*, 2008), pendiente, cargas de combustibles, etcétera. En ocasiones, esta integración requiere de procesos complejos (Vilar *et al.*, 2011) y la cartografía resultante puede tener un uso limitado, si no se presenta en forma

adecuada (Yeguez y Ablan, 2012); para lo cual se debe especificar, entre otros aspectos, la escala, orientación, sistema de georreferencia, etcétera, mediante procedimientos que están bien definidos.

Figura 1. Número de incendios forestales y superficie afectada durante el período 1971-2023, en México (Conafor, 2025).



Unos de los aspectos al que poca atención se le ha dado, además de la especificación del número de las clases, en este caso, de riesgo o peligro de incendio (Torres *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2011), es la definición de los intervalos de clases. Frecuentemente, se hace de manera aleatoria o desde una perspectiva subjetiva, basada en la apreciación personal del generador de la cartografía. Es decir, en principio, al generar un mapa de riesgo de incendio se establecen, por lo general, tres (bajo, medio y alto) o cinco (muy bajo, bajo medio, alto y muy alto) clases de riesgo. Posteriormente, en forma tradicional, se especifican sus intervalos con base en una división de valor de riesgo más alto entre el número de clases, sin ningún criterio que lo justifique.

Existen varios métodos para la definición de los intervalos de cada clase, entre ellos los intervalos iguales, desviación estándar, intervalo geométrico, etcétera (Osaragi, 2002); los cuales se usan en forma indistinta y, más aún, se eligen subjetivamente. Sin embargo, es importante considerar que comparar diferentes clases de riesgo, o intervalos de clases puede resultar en diferencias operativas considerables en relación a la ubicación y dimensionamiento de esas clases.

De acuerdo con esto, el objetivo del presente trabajo fue hacer un análisis comparativo entre dos clasificaciones del número de incendios: tres [bajo, medio y alto] y cinco [muy bajo, bajo medio, alto y muy alto]; las clases se definieron en función de diferentes alternativas de división de los intervalos (intervalo equivalente, rupturas naturales, intervalo geométrico e intervalos por cuantiles). Con base en esto, se propone

un proceso objetivo para definir el número de intervalo de clases (de número de incendios) en cartografía de riesgo de incendios forestales. De tal manera que, al usar el mismo criterio de clasificación se podrán comparar mapas de riesgo de diferentes regiones. La propuesta se ejemplifica con información georreferenciada sobre riesgo, que se define en relación a la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Jalisco.

1.1. NÚMERO DE CLASES DE RIESGO

En forma práctica, se define como riesgo a la probabilidad de que se inicie un incendio forestal (Flores, 2017) y para su determinación se usan varios criterios: la cercanía a caminos, la ocurrencia de incendios, las causas, etcétera. A cada uno de ellos, se le asigna una serie de ponderaciones que, al integrarlas, determinan cierto valor de riesgo de incendio forestal en un lugar en particular. Posteriormente, y debido a limitaciones presupuestales, se establecen áreas prioritarias de atención para lo cual se define un número de clases de riesgo específico y se generan mapas que representan su distribución espacial. Sin embargo, es importante remarcar que la especificación del número de clases de riesgo depende de que ilustren con el suficiente detalle la variación espacial del riesgo de incendios forestales. Por ello, se busca un punto de equilibrio entre un número muy bajo de clase, que no permita detallar adecuadamente el comportamiento del riesgo en el espacio, y uno muy alto que dificulte ubicar y dimensionar a cada una de las clases. Esto se define, generalmente, con base en aspectos perceptivos, así como en relación a la experiencia de quien está a cargo de interpretar la información. Así, se especifican, sin ningún soporte estadístico, tres, cuatro, cinco o más clases de riesgo de incendios forestales; por ejemplo: a) alto, medio y bajo (Atienza *et al.*, 2012; Sevillano *et al.*, 2015); b) muy alto, alto, moderado, bajo (Jaiswal *et al.*, 2002); c) se añaden otras categorías extremas, como riesgo nulo y riesgo extremo (Julio, 1990), o muy bajo y muy alto (IDEAM, 2011). De igual manera, para la definición de mapas de índice de riesgo se pueden adoptar otros índices de determinación de riesgo: a) canadiense: bajo, moderado, alto, muy alto y extremo (Burriel *et al.*, 2006); b) australiano: bajo, moderado, alto, muy alto y extremo (Dowdy *et al.*, 2009); c) americano: bajo, moderado, alto, muy alto y severo (Jolly *et al.*, 2019); brasileño: nulo, pequeño, medio, alto y muy alto (Ziccardi *et al.*, 2020).

1.2. INTERVALOS DE CLASE

Una vez que se define el número de clases de riesgo, se debe determinar el criterio para establecer los intervalos de cada una de ellas. Aunque se sigan procesos específicos, los intervalos se seleccionan de varias formas, lo cual implica que se pueden

tener diferentes intervalos de clasificación para una misma área. La clasificación de dichos procesos es factible realizarla con una perspectiva matemática o estadística (Robinson, 1975); pero, generalmente se determinan bajo criterios empíricos (Evans, 1977). A su vez, estos se subdividen en exógenos y los determinados a partir de su distribución espacial (Evans, 1977). No obstante, el enfoque tiende a ser, más bien, arbitrario con límites fáciles de identificar, sin considerar la distribución original de los datos (Evans, 1977).

En general, se usan procesos de carácter práctico, por ejemplo: 1) dividir matemáticamente entre el número de clases por establecer el intervalo de los valores de riesgo (Conafor, 2010; Castillo *et al.*, 2012); 2) definir la distribución de frecuencia de los valores de riesgo, con lo que la superficie correspondiente a la primera clase de prioridad corresponde a la mitad de la superficie de la segunda clase de prioridad, y está a la mitad de la tercera clase (1/7, 2/7 y 4/7 del total, respectivamente) (Julio, 1990); y 3) a partir de la amplitud de los valores de riesgo generados, seguido de la implementación de la siguiente ecuación (IDEAM, 2011):

$$\text{Amplitud del rango} = [Max1 - Min1] / N$$

Dónde: **Min1** = Valor mínimo normalizado del factor en toda el área de estudio; **Max1** = Valor máximo normalizado presentado por el factor en toda el área de estudio; **N** = Número total de datos de cada factor. Cabe destacar que, en ningún caso se utiliza un soporte estadístico para la definición del intervalo de las clases de riesgo.

1.3. TÉCNICAS DE CLASIFICACIÓN

Al fijar los intervalos de las clases con los que se clasificará la información en el mapa de riesgo de incendio, primeramente, se debe examinar la distribución espacial de los datos, debido a que se pueden presentar las siguientes situaciones (Osaragi, 2002): a) omitir la naturaleza de los datos; b) pérdida de datos, cuando se clasifican los valores numéricos y se representan en mapas para su entendimiento visual; y c) como consecuencia de los puntos anteriores, es posible hacer una mala interpretación de la realidad. Más aún, se debe considerar la propagación de la imprecisión generada mediante los procesos de elaboración de mapas con diferentes clases (Goodchild *et al.*, 1992). Además, se busca especificar el mejor arreglo de valores entre las diferentes clases; en general, se pretenden dos condiciones (Jenks y Coulson, 1963; Jenks 1967): a) que los valores dentro de las clases definan la menor variabilidad; y b) que se logre la mayor variabilidad entre las clases consideradas. De acuerdo a lo anterior, se tienen los siguientes esquemas de clasificación:

Intervalo equivalente o intervalos iguales. Método que divide el intervalo de valores de atributo en un subintervalo del mismo tamaño (Olaya, 2014); se recomienda su empleo cuando la gama de datos es conocida, por ejemplo: porcentajes o datos de temperatura. Se puede utilizar, si se quiere enfatizar la cantidad de un valor, con respecto a los otros valores (Osaragi, 2002). Sin embargo, tiene la desventaja de que hay diferente número de elementos dentro de cada clase (unas con muchos y otras con pocos). Esto es relevante, ya que se pueden tener elementos con valores atípicos que desvirtúan el significado del máximo y el mínimo, al definir la amplitud de cada clase (Olaya, 2014).

Rupturas naturales. Método que se basa en el algoritmo de ruptura natural de Jenks (Jenks, 1967), en el que se identifican puntos de interrupción o patrones de grupos propios de los datos. La separación de la clasificación se divide en clases, cuyos límites se establecen donde hay saltos, relativamente, grandes en los valores (Osaragi, 2002). De esta forma, se pretende definir clases lo más homogéneas posibles, a través de la disminución de la varianza dentro de cada una, con ello se definen clases bien diferenciadas entre sí (Olaya, 2014).

Intervalo geométrico o intervalos de progresión. Herramienta, diseñada específicamente para acomodar datos continuos, con la que se determinan las clases creando rupturas en los intervalos de clase que tienen una serie geométrica. Para optimizarlos, este coeficiente puede cambiar una vez a su inverso; así, el algoritmo genera intervalos geométricos al minimizar la suma de cuadrados del número de elementos de cada clase y se garantiza que cada intervalo de clases tenga, aproximadamente, el mismo número de valores; y que el cambio entre intervalos sea coherente (Olaya, 2014).

Intervalos por cuantiles. A partir de una base de datos, la mediana se divide en dos partes iguales, o bien en más porciones, llamadas cuantiles (cuartiles, quintiles, deciles y percentiles), donde todas las clases contienen el mismo número de elementos. Por ejemplo, al definir cuartiles, los datos se dividen en cuatro clases con igual número de elementos, cuyos límites se ubican en los percentiles 25, 50 y 75. El método es aplicable con valores con distribución lineal (Osaragi, 2002).

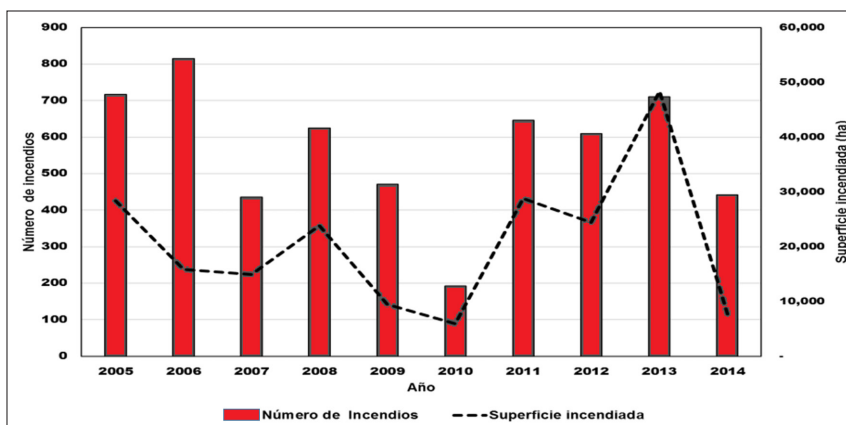
2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El presente trabajo se desarrolló utilizando información del estado de Jalisco, el cual se ubica en el centro occidente de México, con una superficie de 78 588 km², donde 68 % del área presenta clima cálido subhúmedo a lo largo de la costa y zona centro. Mientras que, en 18 % es templado subhúmedo en las partes altas de las sierras y 14

% seco y semiseco en el norte y noreste. A nivel nacional, la entidad ocupa el décimo lugar, por el número de incendios forestales registrados, y el cuarto lugar en superficie afectada. En promedio, cada año se queman alrededor de 22 000 ha (Figura 2), que corresponden a 570 incendios anuales, con un promedio por incendio de 30 ha. El tipo de vegetación más dañado es el pastizal, con casi 12 000 ha en promedio por año; le siguen las áreas forestales con arbustos y matorrales, con alrededor de 8 500 ha anuales; y la superficie quemada con presencia de arbolado adulto asciende, en promedio, a 1 100 ha (Conafor, 2015).

Figura 2. Número de incendios forestales y superficie afectada durante el periodo 2005-2014, en el estado de Jalisco, México.



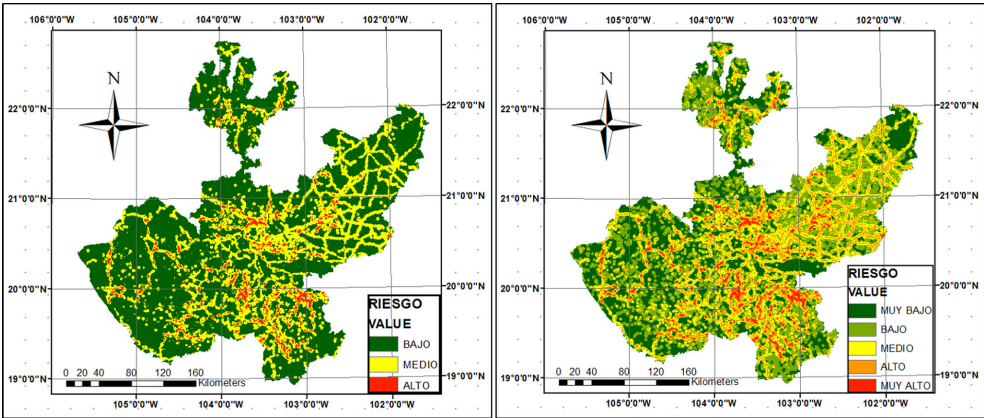
2.2. RIESGO DE INCENDIO

Para ubicar y dimensionar las áreas prioritarias de atención contra incendios forestales, se analizan factores como la topografía, actividades agropecuarias, modelos de combustibles, historial de ocurrencia de incendios, etcétera (Vilchis *et al.*, 2015). Con base en ellos, se elabora la cartografía de áreas de atención prioritaria, para ubicar las acciones preventivas pertinentes, bajo el correspondiente plan de manejo (Calkin *et al.*, 2014). En México, esas áreas se localizan y dimensionan en función de la determinación de criterios de riesgo, peligro y valor (Conafor, 2010). El concepto de riesgo, en forma práctica, se refiere a la probabilidad de que se produzca un incendio forestal en una zona y en un periodo dado (Hardy, 2005); Lo cual depende de varios factores (Julio, 1990; Conafor, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011), que a su vez, se dividen en una serie de variables que reciben una ponderación determinada (Cuadro 1). A partir de ellas, se determinó la variación espacial de las valoraciones de riesgo en el estado de Jalisco (Figura 3).

Cuadro 1. Criterios de ponderación para determinar el riesgo de incendios forestales (Conafor, 2010).

Factor		Variable	Criterio	Ponderación
Poblados	Cercanía		0 – 500 m	4
			500 – 1000 m	3
			1000 – 1500 m	2
			1500 – 2000 m	1
	Densidad		> 50000 habitantes	2
			< 50000 habitantes	1
Camino	Cercanía		0 – 500 m	4
			500 – 1000 m	3
			1000 – 1500 m	2
			1500 – 2000 m	1
	Tipo		Terracería	2
			Pavimentado	1
Ocurrencia histórica de incendios	Cercanía		0 – 500 m	3
			500 – 1000 m	2
			1000 – 21500 m	1
	Causas	- Actividades agropecuarias, fumadores, fogatas		4
			- Actividades forestales, cazadores, limpia de caminos, desconocidas	3
			- Otras actividades productivas, quema en basureros, litigios, descargas eléctricas	2
			- Aprovechamientos, ferrocarril, otros	1

Figura 3. Distribución espacial del riesgo de incendios forestales en el estado de Jalisco, considerando tres y cinco clases.



2.3. NÚMERO DE INTERVALOS

El mapa de riesgo de incendios forestales (Figura 3) se definió a escala estatal, por lo que se estructuró con base en una resolución de píxeles de 120×120 m, a cada uno de los cuales se le asignó un valor de riesgo. La frecuencia de estos valores se presenta en la Figura 4, cuya distribución tiende a la normalidad, con una media de 5.102 y una varianza de 3.929. Mientras que la mayoría de los píxeles con riesgo se ubican entre los valores 3 y 10, además de que se tuvieron pocos píxeles con valores altos de riesgo. A partir de esa distribución, se procedió a la definición de tres y cinco clases, ya que son las más usadas (IDEAM, 2011; Atienza *et al.*, 2012; Sevillano *et al.*, 2015), cuyos intervalos se definieron con los siguientes métodos: a) Intervalos iguales (II); b) Cuantiles (Q); c) Rupturas naturales (QN); y d) Intervalos geométricos (IG). Posteriormente, se hizo un análisis comparativo (ANOVA) entre métodos, para cada clase definida.

2.4. CRITERIO DE SELECCIÓN

Para definir el número de clases y el método más adecuado para establecer los intervalos correspondientes, primero se ubicaron al azar 1 000 sitios de validación (SV) a lo largo del estado de Jalisco. Alrededor de cada uno, se situó una superficie de 100 km² (Figura 5) que corresponde al denominado factor de riesgo de incendio (Flores, 2017; Flores y Macías, 2018), dentro ella se contó el número total de incendios forestales ocurridos en el período 2005-2014. De esta manera, se asoció una clase por sitio (SV) con el número de incendios contabilizados en el área de 100 km² de cada SV.

Figura 4. Frecuencia de los niveles de riesgo de incendios forestales derivados para el estado de Jalisco (México).

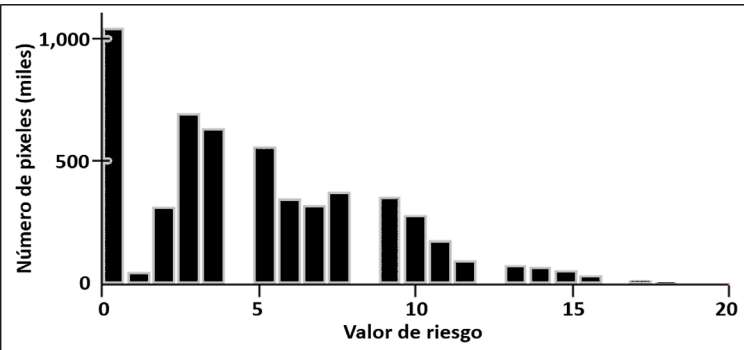
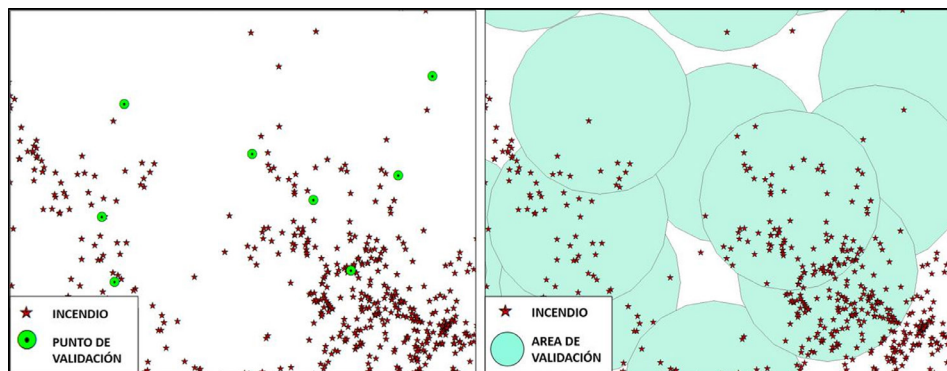


Figura 5. Detalle de la ubicación de los sitios (puntos) de validación y su correspondiente área de 100 km², dentro del estado de Jalisco.



De acuerdo al método usado para definir los intervalos de clases (tres y cinco), cada uno de los SV fue identificado con una clase de riesgo, la cual pudo ser diferente de acuerdo al método de clasificación. Con los valores del número de incendios de cada SV correspondientes a una clase de riesgo se calculó la desviación estándar, como parámetro de comparación entre los diferentes métodos de clasificación. Finalmente, se elaboraron los mapas temáticos, con el propósito de hacer, visualmente, una comparación cualitativa de las diferencias y similitudes entre los métodos de clasificación probados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

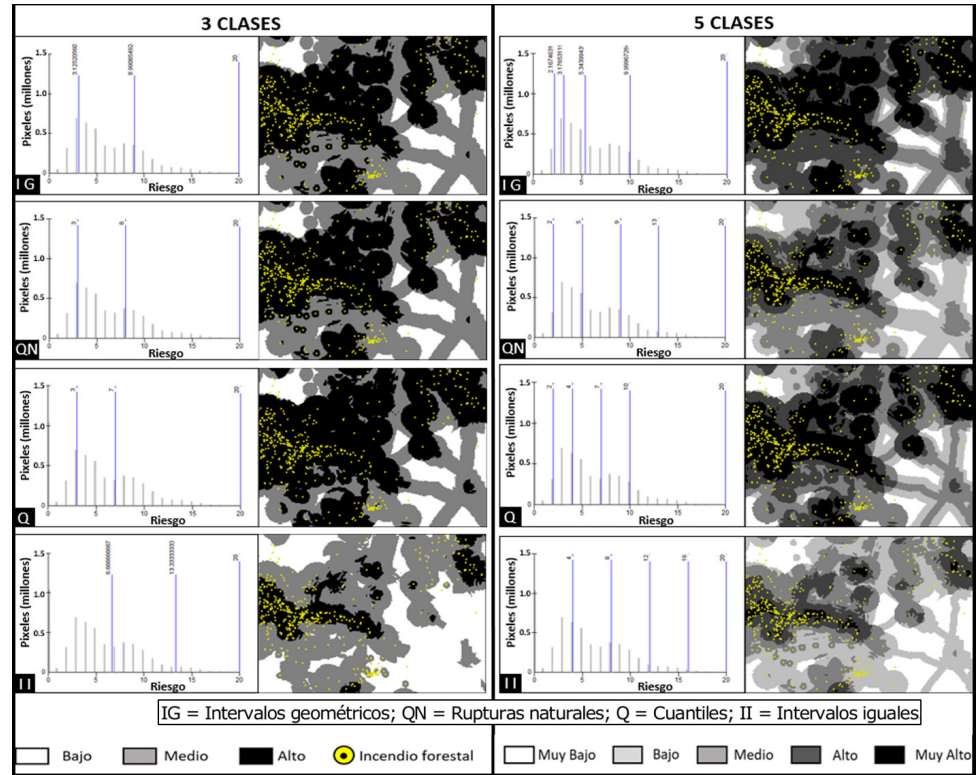
En la Figura 6 se presentan los mapas generados con los diferentes métodos de clasificación; en general, se observan similitudes entre algunos métodos. Sin embargo, es clara la diferencia que representa la distribución espacial de las clases de riesgo derivadas del método de intervalos iguales (II). Asimismo, se muestra la ubicación de los límites de cada intervalo, definidos por los métodos aplicados.

3.1. INTERPRETACIÓN VISUAL

El análisis de los mapas correspondientes a tres clases de riesgo de incendio evidenció que no hay diferencia entre los generados con los métodos IG, QN y Q; además, tanto la definición de los límites de los intervalos como su implementación espacial en los mapas fueron muy similares. No obstante, es clara la diferencia entre el método II con los métodos IG, QN y Q, ya que se redujo el área de la clase Alto riesgo, la cual fue absorbida, mayormente, por la clase de riesgo Medio. Esto se aprecia en la distribución grafica de los límites de cada una de las clases.

Por otra parte, los mapas que resultaron de considerar cinco clases, visualmente fueron muy diferentes, lo cual también se observó en las gráficas correspondientes a los límites de sus intervalos. Sin embargo, fue clara la similitud entre los mapas derivados de los métodos IG y Q, en los que las clases de riesgo Alto y Muy alto abarcaron una mayor superficie. Al igual que en el caso de las tres clases, el mapa generado con el método II tuvo la mayor diferencia. Aunque, es evidente la diferenciación entre las cinco clases, visualmente no se recomienda usar un número muy grande de clases, ya que se puede complicar la interpretación del mapa, al tratar de identificar la simbología de cada una de ellas, lo cual origina posibles equivocaciones (Olaya, 2014).

Figura 6. Detalle de la cartografía sobre la clasificación de riesgo de incendios forestales, generada con diferentes métodos y número de clases.



3.2. INCENDIOS POR CLASE DE RIESGO

Para caracterizar cada una de las clases de riesgo, se evaluó el número de incendios forestales presentes (Cuadro 2). Cuando se consideró la clasificación de solo tres clases, se observó para la clase 1 (riesgo Bajo) que el número de incendios fue el mismo, a excepción del método II que presentó un poco más del doble en comparación

con los otros. En referencia a la clase 2 (riesgo Medio), el comportamiento fue similar, a diferencia de lo obtenido con el método Q, con el cual solo se registró 84.5 % de los incendios ubicados con los métodos IG y QN. Por el contrario, en la clase 3 (riesgo Alto) con el método Q se obtuvo 6.54 % más incendios, en relación a IG y QN; mientras que, el II representó solo 43.3 % de incendios, en comparación con IG y QN.

En la clasificación de cinco clases, el método II resultó en 82.4 % más incendios en comparación a los otros métodos. En cuanto a la clase 2, se presentó variación en todos los casos, destacó una diferencia de 390.3 % entre el número de incendios más bajo (IG) y el más alto (II). Las clases 3 y 4 fueron más similares en su número de incendios. Mientras que, en la clase 5 los métodos IG y Q resultaron en cantidades muy similares, aunque QN y II tuvieron 48.89 y 12.46 %, respectivamente del máximo registrado para la clase IG, con 2 720 incendios. La superficie promedio por incendio fue muy similar entre los métodos, al comparar las clases en la clasificación de tres intervalos; aunque los métodos Q y II presentaron valores menores. En referencia a la clasificación de cinco clases, en general, no hubo una tendencia definida, pero con II se obtuvieron los menores valores en todas las clases, excepto en la clase 1. Los valores más altos variaron por método en cada una de las cinco clases.

Cuadro 2. Variación del número total de incendios (A), hectáreas promedio por incendio (B) y número de sitios de validación (C), por clase y método de definición de intervalos.

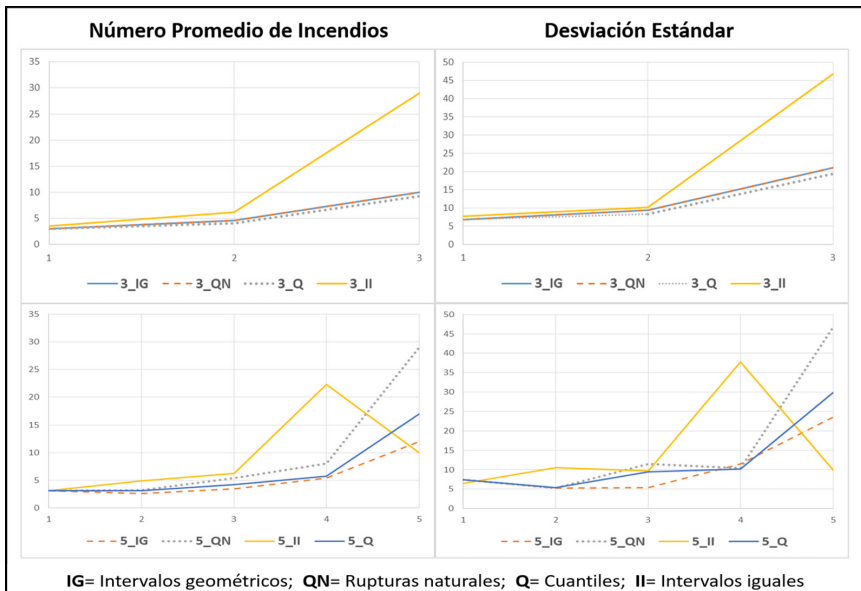
Clase		3-IG	3-QN	3-Q	3-II	5-IG	5-QN	5-II	5-Q
1	A	429	429	429	952	296	296	540	296
	B	7.00	7.00	7.00	5.48	6.79	6.79	7.24	6.79
	C	378	378	378	677	256	256	505	256
2	A	1317	1317	1116	2535	133	442	1206	244
	B	2.43	2.43	2.39	0.94	7.46	6.12	1.90	7.79
	C	424	424	355	294	122	349	297	249
3	A	3071	3071	3272	1330	309	1359	1450	1005
	B	0.54	0.54	0.67	0.20	5.53	1.47	0.89	1.75
	C	197	197	266	28	227	246	149	228
4	A					1359	1390	1282	993
	B					1.47	0.64	0.26	1.45
	C					246	120	46	183
5	A					2720	1330	339	2279
	B					0.42	0.20	0.09	0.33
	C					148	28	2	83

IG= Intervalos geométricos; QN= Rupturas naturales; Q= Cuantiles; II= Intervalos iguales

3.3. VARIABILIDAD ENTRE CLASES

Dado que en la definición de clases de riesgo se busca la existencia de una suficiente variabilidad entre las clases, en la Figura 6 se observa que cuando se usaron solo tres clases, la variabilidad (desviación estándar) fue prácticamente la misma entre las clases definidas con los métodos IG, QN y Q. No obstante, al considerar todos los métodos hubo un ligero incremento de la variabilidad al comparar las clases 1 y 2. La clase 3 (riesgo Alto) se diferencia ampliamente en el caso del método II; esto coincide con la interpretación visual de los mapas (Figura 5), en la cual fue clara la diferencia en la distribución y amplitud de las clases resultantes de la aplicación del método II. Por otra parte, cuando se consideró el número promedio de incendios (Figura 7) correspondiente a cada clase, el comportamiento observado fue muy similar.

Figura 7. Variación del número de incendios promedio y de la desviación estándar, por cada una de las clases de riesgo de incendio forestal.



Al utilizar cinco clases (Figura 6), la variabilidad entre los cuatro métodos fue prácticamente la misma. Sin embargo, para la clase 2 de riesgo el método II definió una mayor desviación estándar; mientras que, los otros métodos presentaron una variabilidad similar. A partir de la clase 3 (riesgo Medio) se observó una mejor diferenciación en la variabilidad entre los cuatro métodos.

En la clase 4 (riesgo Alto) sobresalió, notablemente, la variabilidad resultante del método II, mientras que con el resto de los métodos la variabilidad fue muy similar y

mucho menor. Finalmente, en la clase 5 (riesgo Muy alto) se evidenció una clara diferencia entre la variabilidad de todos los métodos. De acuerdo a lo anterior, al igual que en el caso de las tres clases, el método que mejor diferenciación generó, en la variabilidad entre sus clases, fue el II, seguido de QN. Por otra parte, en relación al número de incendios promedio por clase y definidos por cada método, se observó una ligera variación entre las primeras tres clases, considerando todos los métodos. Esta tendencia también se presentó en la clase 4, pero solo con los métodos IG, QN y Q, ya que con el método II se obtuvo un mayor número de incendios. Respecto a la clase 5, se registró una diferencia más clara al comparar el número de incendios entre los cuatro métodos.

Estos resultados sugieren usar, primeramente, cinco clases en lugar de tres. El método de intervalos iguales (II) fue el mejor para definir los límites entre clases. De acuerdo con ello, el número de clases debe asegurar (Olaya, 2014): a) que no sea tan pequeño, que resuma en exceso la información; b) que permita tener un detalle adecuado de la variación espacial de la variable en estudio; y c) que no sea demasiado grande, para evitar los problemas que aparecían en el caso de no dividir los valores en clases. En general, se sugiere no utilizar más de ocho clases (Olaya, 2014).

Como se señaló, uno de los propósitos al seleccionar el intervalo de cada una de las clases consiste en garantizar una diferencia estadísticamente significativa; de esta forma, los ANOVAS resultantes (Cuadro 3) de la comparación de cada una de las clases respaldaron lo analizado en la Figura 6. Por ejemplo, en la clase 1, de la clasificación de tres clases, no se apreció diferencia entre los métodos usados, lo cual se ratificó con la probabilidad resultante ($p= 0.4430911$) que implicó la inexistencia de diferencia estadísticamente significativa. Mientras que en las clases 2 y 3, si se registró una diferencia significativa entre los métodos.

Cuadro 3. Resultados de los ANOVA al comparar cada una de las clases definidas con los diferentes métodos de delimitación de intervalos.

Número de clases	Clase	F	Probabilidad	Valor crítico para F
3	1	0.89481466	0.443091101	2.609832328
3	2	3.18112253	0.023160437	2.61087455
3	3	6.90044144	0.000139627	2.617925093
5	1	0.00021454	0.999995655	2.61193174
5	2	4.73216689	0.0027658	2.613689205
5	3	3.3029531	0.019820786	2.615426601
5	4	18.0573828	3.18473E-11	2.619980452
5	5	2.85170654	0.037876469	2.63972568

Por otra parte, en el caso de la clasificación con cinco intervalos, a excepción de la clase 1, el resto de las clases resultaron con diferencia estadísticamente significativa, al comparar los métodos.

Finalmente, se resalta la falta de trabajos recientes similares, por lo que no fue posible realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos. Esto implica que desde el estudio de Jenks (1967), poco se ha investigado sobre la definición de un proceso analítico para la selección del número de clases y del método más apropiado para la delimitación de los intervalos de esas clases, que conlleven a realizar una adecuada clasificación del riesgo de incendios forestales. Lo anterior permitirá tener bases estadísticas para una mejor ubicación o dimensionamiento de las clases de riesgo de incendio forestal.

4. CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que el método de intervalos iguales (II) es el más indicado para definir los intervalos de clase de riesgo de incendios. Ya que, en el caso de usar tres clases, aunque no hay diferencia en las clases 1 y 2, si es clara su mayor variabilidad en la clase 3. La variabilidad por clase con el resto de los métodos es prácticamente la misma. En el caso de emplear cinco clases, el método II presenta una variabilidad diferente en las clases 2, 4 y 5. En este caso, un método alternativo es el de IG, ya que presenta una diferenciación en su variabilidad en las clases 3 y 5.

Referente al número de clases, los resultados sugieren que existe una mayor diferenciación entre las clases, cuando se utilizan cinco clases; incluso esta se observa a partir de la clase 2 y es más evidente en la clase 5, en la cual todos los métodos presentan una variabilidad diferente en el número de incendios.

Por la definición de riesgo de incendio forestal, como lo muestran los resultados, se espera un mayor número de ellos en las clases de más riesgo, aunque es importante señalar que hubo poca variación en las primeras tres categorías de riesgo.

Es relevante destacar que, los resultados obtenidos en este trabajo no pueden estandarizarse para todas las situaciones de la definición de riesgo de incendios forestales. No obstante, el proceso metodológico que aquí se presenta es aplicable en futuras investigaciones cuyo objetivo sea definir tanto el número de clases de riesgo, como los límites de los intervalos de cada clase, y con ello dejar de usar clasificaciones subjetivas. Más aún, se sugiere probar variaciones en intensidades y formas de sitios de validación, así como otros números de clases.

5 BIBLIOGRAFÍA

Atienza H., J., P. Muñoz A. y P. Balladares S. 2012. Determinación de prioridades de protección contra incendios forestales en la región de Valparaíso, Chile. *Revista Cartográfica*, (88): 147-82.

Ávila F., D. Y., M. Pompa G. y E. Vargas P. 2010. Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16 (2): 253-260.

Burriel M., J. A., F. X. Castro D., T. Mata B., D. Montserrat A., E. Gabriel de F. y J. J. Ibáñez I. M. 2006. La mejora del mapa diario de riesgo de incendio forestal en Cataluña. In: XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Granada. 20 de septiembre de 2006. Editorial Universidad de Granada. Santa Perpetua de Moguda, España. pp. 651-666.

Calkin, D. E., J. D. Cohen, M. A. Finney and M. P. Thompson. 2014. How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *PINAS*, 111(2): 746-751.

Carrillo G., R. L., D. A. Rodríguez T., H. Tchikoué, A. I. Monterroso R. y J. Santillán P. 2012. Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *INTERCIENCIA*, 37(9): 678-683.

Castillo S., M., R. Garfías S., G. Julio A. y L. González R. 2012. Análisis de grandes incendios forestales en la vegetación nativa de Chile. *INTERCIENCIA*, 37(11): 796-804.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2010. Procedimiento para elaboración de un mapa de áreas de atención prioritaria contra incendios forestales. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jal., México. pp. 9-11.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2015. Reportes semanales de resultados de incendios forestales. Información de cierre de estadísticas de incendios forestales del 2007 al 2015. Comisión Nacional Forestal. <https://snigf.cnf.gob.mx/incendios-forestales/> (29 de mayo de 2020).

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2025. Estadísticas de incendios forestales desde 1970 al 2024 en Números. Comisión Nacional Forestal. <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/> (8 de julio de 2025).

de la Riva, J., F. Pérez-Cabello, N. Lana-Renault and N. Koutsias. 2004. Mapping wildfire occurrence at regional scale. *Remote Sensing of Environment*, (92): 288-294.

de Torres C., M., L. Ghermandi y G. Pfister. 2008. Los incendios en el noroeste de la Patagonia: su relación con las condiciones meteorológicas y la presión antrópica a lo largo de 20 años. *Ecología Austral*, 18(2): 153-167.

Dowdy, A. J., G. A. Mills, K. Finkle and W. de Groot. 2009. Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. The Centre for Australian Weather and Climate Research. Melbourne, Australia. 84 p.

Evans, I. 1977. The selection of class intervals. *Institute of British Geographers, Transactions (New Series)*, 2(1): 98-124.

Flores G., J. G. 2017. Unidad de muestreo para determinar la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(43): 117-142.

Flores G., J. G. and A. Macías M. 2018. Bandwidth selection for kernel density estimation of forest fires. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3): 313-327.

- Goodchild, M. F., S. Guoqing and Y. Shiren 1992. Development and test of error model for categorical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(2): 87-104.
- Hardy, C. C. 2005. Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context. *Forest Ecology and Management*, 211: 73-82.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2011. Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal. Colombia. 109 p.
- Jaiswal, R. K., S. Mukherjee, K. D. Raju and R. Saxena 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, (4): 1-10.
- Jenks, G. F. and M. Coulson. 1963. Class intervals for statistical maps. *International Yearbook of Cartography*, 4(3): 119-134.
- Jenks, G.F. 1967. The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7: 186-190.
- Jolly, W. M., P. H. Freeborn, W. G. Page and B. W. Butler. 2019. Severe Fire Danger Index: A Forecastable Metric to Inform Firefighter and Community Wildfire Risk Management. *Fire*, 2(47): 2-24.
- Julio A., G. 1990. Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para Chile. *Bosque*, 11(2): 59-72.
- Kuter, N., F. Yenilmez and S. Kuter. 2011. Forest fire risk mapping by kernel density estimation. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 32(2): 599-609.
- Magaña T., S. O. y F. C. Romahn V. 1987. Determinación del índice de peligro de incendio forestal para Tlahuapán, Puebla. *Ciencia Forestal*, 12: 58- 67.
- Mildrexler, D., Z. Yang, W. B. Cohen and D. M. Bell. 2016. A forest vulnerability index based on drought and high temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 173: 314-325.
- Mohammadi, F., M. R. Bavaghar and N. Shabanian 2014. Forest fire risk zone modeling using logistic regression and GIS: an Iranian case study. *Small-scale Forestry*, 13: 117-125.
- Olaya, V. 2014. Sistemas de información geográfica. CreateSpace Independent Publishing Platform. Madrid, España. 854 p.
- Osaragi, T. 2002. Classification methods for spatial data representation. Center for advanced spatial analysis (CASA). University College London. London, United Kingdom. Working Paper Series No. 40. 19 p.
- Pan, J., W. Wang and J. Li, 2016. Building probabilistic models of fire occurrence and fire risk zoning using logistic regression in Shanxi Province, China. *Natural Hazards*, 81: 1879-1899.
- Pérez V., L. Márquez, O. Cortés y M. Salmerón 2013. Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2): 37-58.
- Robinson, A. H. and B. B. Petchenik 1975. The Map as a communication system. *Cartographic Journal*, (12): 7-15.
- Rodríguez, T., D. A., C. Tchikoué, C. Cíntora G., R. Contreras A. y A. de la Rosa V. 2011. Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia*, 45(5): 593-608.

Rojo, M., P. Santillán, M. Ramírez y B. Arteaga M. 2001. Propuesta para determinar índices de peligro de incendio forestal en bosque de clima templado en México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(1): 39-48.

Salvati, L. and A. Ferrara 2015. Validation of MEDALUS Fire Risk Index using Forest Fire Statistics through a multivariate approach. *Ecological Indicators*, 48: 365-369.

Sevillano, M. E., O. A. Toro y P. A. Ruiz 2015. Aplicación de SIG al análisis de riesgo pro incendios forestales en el municipio de Yotoco Colombia, 2014. 2015. In: *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ-2015*. 12-16 de octubre de 2015. Ciudad Juárez, Chih., México. pp. 12-16.

Torres R., J. M., O. S. Magaña T. y G. A. Ramírez F. 2007. Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. *Agrociencia*, 41(6): 663-674.

Vega-Nieva, D., J. Briseño-Reyes, M. Nava-Miranda, E. Calleros-Flores, P. López Serrano, J. Corral-Rivas, E. Montiel-Antuna, M. I. Cruz-López, M. Cuahutle, R. Ressler, E. Alvarado-Celestino, A. González-Cabán, E. Jiménez, J. Álvarez-González, A. Ruiz González, R. Burgan and H. Preisler. 2018. Developing Models to Predict the Number of Fire Hotspots from an Accumulated Fuel Dryness Index by Vegetation Type and Region in Mexico. *Forests*, 9(4): 190.

Vilar, H. L., M. P. Martín I. and F. J. Martínez V. 2011. Logistic regression models for human-caused wildfire risk estimation: analyzing the effect of the spatial accuracy in fire occurrence data. *European Journal of Forest Research*, 130: 983-996.

Vilchis, F., A. Y., C. Díaz D., D. Magaña L., K. M. Bá y M. A. Gómez A. 2015. Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia*, 49(7): 803-820.

Villers R., L. y J. López B. 2004. Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el Volcán la Malinche. In: Villers R., L. y J. López B. (eds.). *Incendios forestales en México. Métodos de evaluación*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México, D.F., México. pp. 57-74.

Yeguez, M. y M. Ablan. 2012. Índice de riesgo de incendio forestal dinámico para la cuenca alta del río Chama. *Revista Forestal Venezolana*, 56(2): 127-134.

Ziccardi, L., C. R. Thiersch, A. Miho Y., P. Fearnside and P. J. Ferreira F. 2020. Forest fire risk indices and zoning of hazardous areas in Sorocaba, São Paulo state, Brazil. *Journal of Forestry Research*, 31(2): 581-590.

CAPÍTULO 6

PHYTOCLIMATIC DYNAMICS IN NATURAL OROMEDITERRANEAN FORESTS OF *Pinus sylvestris* L. IN THE CENTRAL SPANISH IBERIAN PENINSULA. SUITABILITY AND VERSATILITY UNDER CLIMATE CHANGE

Data de submissão: 26/05/2025

Data de aceite: 17/06/2025

Carmen Allué Camacho

Servicio Territorial de Medio Ambiente

Junta de Castilla y León

Burgos, España

<https://orcid.org/0009-0005-5459-9500>

Javier M. García López

Servicio Territorial de Medio Ambiente

Junta de Castilla y León

Burgos, España

<https://orcid.org/0009-0003-8779-6098>

ABSTRACT: The effects of phytoclimatic dynamics in Mediterranean high mountains on the current and future phytoclimatic suitability of natural oromediterranean Scots pine forests (*Pinus sylvestris* L.) are analysed at a specific location, “Puerto de Navacerrada” (Guadarrama mountains, Central Spain, 1893 m), between 1951 and 2024. The use of phytoclimatic models applied to the temporal dynamics of the values of 12 climatic variables in 30-year mobile averages allows quantifying the changes of increasing thermoxericity in the site suitability indices for 24 physiognomies

and 20 forest types. The results suggest that for the time being the dominant forest will continue to be those dominated by *Pinus sylvestris*, but with evolution from oroborealoid towards nemoromediterranean phytoclimatic positions, which will decrease the current exclusivity of pine, allowing the gradual entry of the deciduous broad-leaved species *Quercus pyrenaica* from lower altitudes. This suggests an increase of their phytoclimatic versatility and a decrease in their vulnerability, although it augurs changes in composition, physiognomy and interspecific competition relations, which will force us to rethink adaptive management planning and actions.

KEYWORDS: phytoclimatology; climate change; suitability; versatility; *Pinus sylvestris*; vulnerability; adaptive management.

1. INTRODUCTION

The adaptation of forest ecosystems to the new challenges posed by climate change so that they can continue to provide vital services to man and the planet must be a priority objective of forest managers, especially when the long life-span of trees does not allow for rapid adaptation to environmental changes (Davis et al., 2005; Kremer, 2007). Forests ecosystems can respond to climate change by shifting distribution, by remaining in

isolated pockets of suitable environment (refugia), becoming extinct or by adapting its composition, internal competitive relationships or structure to changing conditions (Holt, 1990; García López & Allué Camacho, 2013).

Phytoclimatic temporal dynamics should be adequately taken into account when planning and implementing preventive active management and conservation policies sufficiently in advance and based on scientific evidence. The development of models to assess and predict possible changes that have occurred or may occur in the future in forest ecosystems, as a consequence of shifts in the suitability of the environment is currently one of the main challenges at present (Condit et al., 2005, Guisan & Thuiller, 2005).

Mediterranean forest ecosystems are generally highly vulnerable to climate change (Lindner et al., 2010; García López & Allué Camacho, 2012), specially forests located close to their altitudinal or latitudinal limit may show more complex and heterogeneous responses to climate change (Malanson, 2001).

Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is a naturally-occurring species in taiga forests in northern Europe and Asia, being its northern area of distribution more or less continuous on plains, whereas in the south, in the Mediterranean region, it is becoming increasingly fragmented and confined to mountain areas. The oromediterranean *Pinus sylvestris* pine forests of the central Iberian Peninsula, such as those of the Guadarrama mountains (Spain), are therefore of special interest because they are located near the southern limit of their global distribution, at the altitudinal limit of tree vegetation and due to their incompatibility with high values of thermoxericity.

In the present work we study the phytoclimatic dynamics in a representative location of this type of forest ecosystems, the weather station “Puerto de Navacerrada”, located at 1893 m altitude in the National Park ‘Sierra de Guadarrama’ (Figure 1), in order to evaluate the possible consequences of climate change in these ecosystems and on their future management.

The natural altitudinal cliserie of the study area is composed of evergreen holm oak forests of *Quercus ilex* ssp. *ballota* in the lower zones, deciduous oak forests of *Quercus pyrenaica* in the middle zones, and pine forests of *Pinus sylvestris* in the higher zones, which constitute the treeline. Above them, there are woodlands dominated by *Cytisus oromediterraneus* and *Juniperus communis* ssp. *alpina* and, in the culminating zones, grasslands of *Festuca indigesta* ssp. *lagascae*.

Figure 1. Natural pine forests of *Pinus sylvestris* in Spain and the situation of the study area.



Figure 2. Oromediterranean natural *Pinus sylvestris* forests in the study location (Puerto de Navacerrada, 1893 m). In the foreground *Cytisus oromediterraneus* and *Juniperus communis* ssp. *alpina* woodlands.



Figure 3. Broad-leaved deciduous *Quercus pyrenaica* forests in middle altitudinal areas of Guadarrama mountains.



2. MATERIALS AND METHODS

Two phytoclimatic models were used: The original Allué-Andrade (1990) updated model, which provides the season suitability for a set of 24 previously established phytoclimatic subtypes corresponding to large physiognomies or life strategies of dominant canopies (FVN model), and the CAF model (García López & Allué Camacho, 2011), which provides the site suitability index for a set of 20 tree species with the capacity to form dominant forest canopies. An updated version of both models, their conceptual bases and guidelines for results interpretation can be found in Allué Camacho & García López (2024). The temporal dynamics component was introduced in both models by calculating the values of 12 phytoclimatic variables (Table 1) in 30-year mobile averages between 1951 and 2024.

Table 1: Phytoclimatic variables used.

	Variable	Unit
K	Intensity of aridity. Calculated on the basis of the quotient As/Ah , where Ah is the humid area of the climodiagram (Pi curve above the Ti curve, i.e., $2Ti < Pi$) and As is the dry area of the climodiagram (Pi curve below the Ti curve, i.e., $2Ti > Pi$). Ti and Pi are the mean temperature and precipitation of the month i	
A	Duration of aridity in the sense of GAUSSEN, that is the number of months in which the Ti curve is above the Pi curve, i.e., $2Ti > Pi$	months
P	Total annual precipitation	Mm
PE	Minimum summer precipitation (June, July, August or September)	Mm
TMF	Lowest monthly mean temperature	°C
T	Mean annual temperature	°C
TMC	Highest monthly mean temperature	°C
TMMF	Average of the minima of the month with the lowest mean temperature	°C
TMMC	Average of the maxima of the month with the highest mean temperature	°C
HS	Certainty of frost. Calculated as the number of months in which $Ti \leq 4^{\circ}C$	months
PV	Period of free plant activity, calculated as the number of months in which $Ti \geq 7.5^{\circ}C$, not counting periods where $A > 0$	months
OSC	Thermal oscillation. Calculated as $TMC - TMF$	°C

The phytoclimatic habitat suitability niche-based CAF model assesses simultaneously non-linear, nonstatistical and dual measurements of proximity/potentiality of a target site concerning climatic ranges of 20 natural phytologies (forest arboreous types).

The traditional environmental space is founded in classic ecological niche theory and is defined by climatic variables regarding temperature and precipitation. Through a specific transfer function, this climatic space is replaced by a suitability space. A set of phytoclimatic distances evaluates the climatic suitability of a site for a forest type.

The model considers a 12-dimensional climatic hyper-space corresponding to the $n=12$ climatic variables. Thus, within the geographical scope of the model the respective forest types ranges or realised niches can be explicitly defined by calculating convex hulls. Although many shapes could be used to enclose the points, the convex hull is defined as the smallest convex set enclosing them and therefore reduces the amount of empty space compared with other volumes like parallelepipeds. Therefore, each range takes the form of a convex hyperpolyhedron which can be explicitly defined by a set of vertices and linking edges.

Regarding the complexity of explicitly determining the hyperpolyhedron for $n > 2$, it is best calculated by means of projections onto m climatic planes with no ViVj repetition formed by climatic variables V_i and V_j , where

$$m = \binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$$

Each variable appears in $n-1$ ViVj projections. The number of possible combinations is less than a factorial to avoid redundancies, as projections ViVj and VjVi give the same information. For the $n = 12$ climatic variables used $m = 66$ polyhedrons are fitted for the 20 forest types.

A target point P whose coordinates are (V_{ip}, V_{jp}) in the plane ViVj is suitable for a specific woodland type if it occurs inside the polyhedron that represents the projection of the plane of the full range of the type, i.e. the entire hyperpolyhedron in the climatic 12-dimensional hyperspace. The target point's position with respect to the projected polyhedron is related to its degree of compatibility or suitability by a transfer function (Allué Camacho & García López, 2024):

$$\phi_P^{V_i} = K_{V_{ip}} \left[\frac{2V_{ip} - V_{i_{\max}} - V_{i_{\min}}}{V_{i_{\max}} - V_{i_{\min}}} \right]^{2\hat{\sigma}}$$

Between the two bounds of a variable V_i ($V_{i_{\max}}$ and $V_{i_{\min}}$), the maximum of the curve is not a peak but a plateau or large central zone of maximum compatibility where the function takes the value 1 for a target point P. Then there is a sharp decline outwards the edges, where it takes the value 0, and outside this range the values are negative. $K_{v_{ip}}$ assesses the capacity to predict species occurrences that the value V_{ip} of a climatic variable V_i acquires at a site P and can be estimated as the inverse of the number of species considered in the model with which V_{ip} is compatible.

We assume that the degree of suitability for a wood-land type will be greater in occurrence sites situated far from the bounds of their 66 convex climatic ranges (0), and the average of its m values in the m climatic planes can be used as a Phytoclimatic Suitability Index (PSI). Unlike statistical models, the concept of suitability in CAF is not related to the frequency of species occurrence within their geographical ranges.

3. RESULTS

3.1. CLIMATIC VARIABLES DYNAMICS

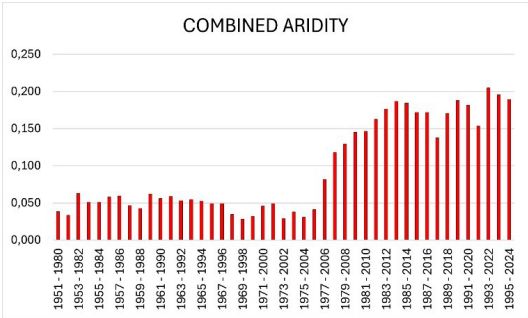
Figure 4 shows the variables time evolution in 30-year mobile averages. A clear upward evolution of temperatures is observed throughout the period studied, both for maximum and minimum temperatures. The mean annual temperature (T) rises from 5.8°C in the first period analysed (1951-1980) to 7.6°C in the last (1995-2024), showing the most homogeneous trend, followed by that of the maxima. Precipitation, although with a less homogeneous behaviour than temperatures, shows a general downward trend, especially the minimum monthly precipitation from the period 1975-2004. All this causes increasing values of the combined factors of a thermo-pluviometric nature related to thermoxericity, like the intensity and duration of aridity (K and A), with K showing higher relative increases than those of A . The global warming also causes a slight increase in the length of the growing season (PV).

Figure 4. Phytoclimatic factorial dynamics in three-year mobile averages between 1951 and 2024.



The Combined Aridity (CA), which jointly integrates the concepts of intensity (K) and duration (A) ($CA=K.A$), specially shows a clear trend change from the period 1975-2004, from mean values of 0.046 (with a maximum of 0.063 and $Stdv=0.010$) to mean values of 0.163, with a maximum of over 0.200 ($Stdv= 0.030$), values never before recorded in the time period analysed (Figure 5).

Figure 5. Evolution of Combined Aridity (CA) values in 30-year mobile averages at “Puerto de Navacerrada” between 1951 and 2024.



3.2. FVN MODEL

In the FVN model of physiognomies, the site suitability to a phytoclimatic subtype is expressed through the corresponding suitability index (PSI), which can be a maximum of 1, followed by a letter that indicates in each case if the point is Genuine (G) for being inside the factorial scope of existence of the subtype defined by a parallelepiped in the 12-dimensional factorial hyperspace, if it is Analogous (A) for being external but very close to the domain or if on the contrary it is Disparate (D) for being external and further away from the domain at least in relation to some factor, being able to be disparate close depending on this distance. Table 2 shows a simple dichotomous factorial key of separation between the 24 physiognomic types that make up the model.

Table 2. Qualitative numerical key to the physiognomic types used in the FVN model.

TMMF > -5	3 ≤ A < 11,44	TMMF > 0	A > 11,44		III(IV)	Sub-tropical sub-mediterranean deserts	
			K ≥ 7	TMC ≥ 26,5	IV(I)	Mediterranean infra-arboreous sub-tropical sub-desert	
				TMC < 26,5	IV ₁	Mediterranean infra-arboreous stepic	
			K < 7	TMF ≥ 9,5	IV ₂	Mediterranean arboreous illicic or non-illicic	
				P ≤ 500	IV ₂	Mediterranean true illicic drier	
		TMMF ≤ 0	TMF < 9,5	P > 500	IV ₂	Mediterranean typical true illicic less dry	
				TMF > 2	IV(VI) ₁	Mediterranean transitional towards deciduous broad-leaved trees	
			TMF ≤ 2		IV(VI)	Mediterranean transitional towards cold steppe	
			TMF ≥ 7,5	P ≤ 850	IV(VI) ₂	Mediterranean transitional towards deciduous broad-leaved trees thetyc	
				P > 850	V(IV) ₂	Nemoro-lauroid oceanic tending towards mediterranean	
	1,25 ≤ A < 3	TMMF < 7,5	HS < 5	TMF < 5	VI(IV) ₁	Dry nemoromediterranean sub-sclerophyll with marcescent broad-leaved trees	
				P ≤ 725	VI(IV) ₂	Humid Nemoromediterranean sub-sclerophyll with marcescent broad-leaved trees	
			TMF < 7,5	P > 725	VI(IV) ₂	Mediterranean atlantic transitional towards deciduous broad-leaved trees thetyc	
				TMF ≥ 5	IV(VI) ₂	Oroborealoid sub-stepic	
			HS ≥ 5		VIII(VI)	Nemoromediterranean with broad-leaved evergreen trees	
		P ≤ 950	HS ≥ 0		VI(IV) ₁	Nemoro-stepic with marcescent broad-leaved trees	
			TMF ≥ 7,5		VIII(VI) ₂	Oroborealoid tending towards nemoro-stepic	
			TMF < 7,5		VII(V)	Typical oceanic nemoro-lauroid deciduous broad-leaved trees	
			TMF > 4		VI	Typical Nemoral deciduous broad-leaved trees	
			P > 950	TMF ≤ 4	HS < 5	VIII(VI) ₂	Oroborealoid tending towards deciduous broad-leaved trees
					HS ≥ 5	X(IX) ₁	Sub-stepic oroarcticoid
TMMF ≤ -5	A > 0	A ≥ 1,24		X(IX) ₂	Oroarcticoid non arboreous with xerothermia		
		A < 1,25		TMC > 12	X(VIII)	Typical oroborealoid	
	A = 0			TMC ≤ 12	X(IX) ₁	Oroarcticoid non arboreous without xerothermia	

The temporal evolution of the PSI to the 24 phytoclimatic types of physiognomic significance (Table 3) shows three stages: The first, up to the period 1976-2005 corresponds to humid subnemoral oroborealoid physiognomies (VIII(VI)₂). The second, up to the period 1994-2023, corresponds to a shift towards sub-steppe oroborealoid positions of type VIII(VI), mainly caused by an increase in the duration of aridity (A), but without sufficient warming to enter into phytoclimatic positions typical of deciduous broad-leaved forests. It is in the last period analysed (1995-2024) that a change in trend towards deciduous broad-leaved physiognomies (VI(IV)₂) seems to have begun, whose establishment have to be confirmed in the coming years.

Table 3. Evolution of the phytoclimatic suitability scalars of the FVN model. In green the Genuine positions (G), in orange the Analogous (A), in yellow the Positive Disparate (D) and in white the Negative Disparate (D).

PERIODO	IV ₄	VI(IV) ₂	VI	VIII(VI)	VIII(VI) ₂	X(IX) ₂
1951-1980	-10,70D	-0,03D	0,21D	0,59A	0,59G	0,48D
1952-1981	-10,18D	0,01D	0,23D	0,57A	0,59G	0,44D
1953-1982	-9,81D	0,06D	0,19D	0,65A	0,55G	0,40D

1954-1983	-9,83D	0,03D	0,20D	0,62A	0,55G	0,37D
1955-1984	-9,88D	0,03D	0,19D	0,63A	0,56G	0,39D
1956-1985	-9,64D	0,07D	0,19D	0,65A	0,55G	0,34D
1957-1986	-9,32D	0,10A	0,19D	0,64A	0,54G	0,25D
1958-1987	-9,41D	0,10A	0,22D	0,61A	0,56G	0,27D
1959-1988	-9,63D	0,09A	0,24D	0,60A	0,58G	0,33D
1960-1989	-9,34D	0,11A	0,20D	0,65A	0,54G	0,29D
1961-1990	-9,04D	0,14A	0,21D	0,63A	0,53G	0,24D
1962-1991	-9,29D	0,13A	0,19D	0,64A	0,53G	0,32D
1963-1992	-9,11D	0,15A	0,21D	0,62A	0,54G	0,25D
1964-1993	-8,95D	0,17A	0,20D	0,63A	0,53G	0,20D
1965-1994	-8,92D	0,19A	0,21D	0,63A	0,53G	0,24D
1966-1995	-8,51D	0,23A	0,23D	0,62A	0,52G	0,14D
1967-1996	-8,65D	0,22A	0,23D	0,62A	0,53G	0,19D
1968-1997	-8,66D	0,21A	0,30D	0,57A	0,56G	0,18D
1969-1998	-9,06D	0,16A	0,32D	0,48A	0,58G	0,15D
1970-1999	-9,27D	0,13A	0,34D	0,44A	0,59G	0,16D
1971-2000	-8,60D	0,22A	0,29D	0,57A	0,54G	0,12D
1972-2001	-8,35D	0,25A	0,29D	0,58A	0,53G	0,11D
1973-2002	-8,23D	0,24A	0,35D	0,48A	0,56G	0,03D
1974-2003	-7,86D	0,30A	0,32D	0,55A	0,54G	0,06D
1975-2004	-7,88D	0,32A	0,34D	0,51A	0,54G	0,06D
1976-2005	-7,66D	0,35A	0,32D	0,54A	0,52G	0,04D
1977-2006	-7,04D	0,41A	0,24D	0,64G	0,42A	0,05D
1978-2007	-6,57D	0,45A	0,16D	0,67G	0,31D	-0,18D
1979-2008	-6,33D	0,48A	0,14D	0,68G	0,25D	-0,36D
1980-2009	-6,22D	0,50A	0,11D	0,70G	0,08D	-0,62D
1981-2010	-6,19D	0,51A	0,09D	0,69G	0,06D	-0,67D
1982-2011	-6,10D	0,52A	-0,01D	0,70G	-0,23D	-1,16D
1983-2012	-5,96D	0,55A	-0,15D	0,72G	-0,52D	-1,67D
1984-2013	-5,84D	0,56A	-0,70D	0,74G	-1,91D	-4,13D
1985-2014	-5,88D	0,54A	-0,22D	0,71G	-0,70D	-1,98D
1986-2015	-5,71D	0,56A	-0,07D	0,70G	-0,42D	-1,51D
1987-2016	-5,58D	0,58A	-0,06D	0,69G	-0,41D	-1,46D
1988-2017	-5,75D	0,55A	-0,18D	0,65G	-0,17D	-0,43D
1989-2018	-5,39D	0,60A	-0,07D	0,70G	-0,35D	-1,36D
1990-2019	-5,15D	0,60A	-0,24D	0,70G	-0,75D	-2,07D
1991-2020	-4,83D	0,62A	-0,12D	0,66G	-0,67D	-1,98D
1992-2021	-5,09D	0,60A	-0,14D	0,64G	-0,10D	-0,96D

1993-2022	-4,52D	0,65A	-0,41D	0,67G	-1,35D	-3,21D
1994-2023	-4,50D	0,65A	-0,27D	0,64G	-1,06D	-2,60D
1995-2024	-4,39D	0,66G	-0,18D	0,60A	-1,05D	-2,67D

Substeppic type VIII(VII) would imply physiognomies more typical of clear forests of *Pinus sylvestris* on undergrowth of cushiony thorny scrub, as occurs in the few relict forests of this species in the absolute southern limit of Spain, the Baza and Sierra Nevada Betic mountain ranges, due to a combination of cold and dryness. However, the increasing warming seems to determine the rupture of the steppic cold/dryness binomial and therefore the advance towards deciduous broad-leaved types, more adapted to milder temperatures, so that type VIII(VII) ends up being transitory.

This evolution can be seen in the column corresponding to physiognomic type VI(IV)₂, which shows its gradual approach from negative disparity positions to positive disparity, analogy and finally genuineness, with increasing values of adequacy.

3.3. CAF MODEL

The application of the CAF Model to the 'Puerto de Navacerrada' location makes it possible to obtain the suitability indices for the 20 forest types, representative of the main wooded forest covers in Spain: *Pinus uncinata* (Pun), *Pinus sylvestris* (Psy), *Abies alba* (Aal), *Fagus sylvatica* (Fsy); *Quercus petraea* (Qpe); *Quercus robur* (Qro); *Abies pinsapo* (Api), *Pinus nigra* (Pni), *Quercus humilis* (Qhu), *Quercus pyrenaica* (Qpy); *Quercus faginea* (Qfa), *Juniperus thurifera* (Jth), *Quercus canariensis* (Qca), *Quercus suber* (Qsu), *Quercus ilex* (Qil), *Pinus pinea* (Ppi), *Pinus halepensis* (Pha), *Pinus pinaster* (Ppr), *Castanea sativa* (Csa) y *Olea europaea* (Oeu).

The suitability indices of five of these forest types are presented in Table 4, which shows how *Pinus sylvestris* forests are the most suitable and therefore the most compatible throughout the whole period analysed. The forest types dominated by the deciduous broad-leaved *Quercus pyrenaica* species continuously increase their phytoclimatic proximity to our study station. The deciduous species *Quercus petraea*, which is more nemoral than the previous one, and which is scarcely present in the Sierra de Guadarrama, also increases its suitability, although in a more discreet way. The broad-leaved evergreen forests of *Quercus ilex* ssp. *ballota*, also increase their suitability, from positions of certain remoteness (negative disparity) to analogies of low suitability, going through intermediate positions of positive disparity. *Pinus nigra* pine forests, more mediterranean and xerophytic than *Pinus sylvestris*, also increase their proximity but remain in negative disparities during the whole period analysed.

Table 4. Evolution of the phytoclimatic suitability indices of the 5 closest forest species of the CAF model with respect to the “Puerto de Navacerrada” meteorological station. In green the Genuine positions (G), in orange the Analogous ones and in yellow the positive Disparate ones (D) and in white the negative Disparate ones (D).

PERIODO	Psy	Qpe	Qpy	Qil	Pni
1951-1980	0,56G	0,33A	0,12A	-0,11D	-1,63D
1952-1981	0,57G	0,36A	0,15A	-0,08D	-1,52D
1953-1982	0,56G	0,28A	0,14A	-0,09D	-1,51D
1954-1983	0,58G	0,29A	0,13A	-0,09D	-1,50D
1955-1984	0,55G	0,27A	0,12A	-0,10D	-1,56D
1956-1985	0,55G	0,27A	0,14A	-0,09D	-1,51D
1957-1986	0,56G	0,27A	0,15A	-0,09D	-1,46D
1958-1987	0,58G	0,33A	0,18A	-0,07D	-1,43D
1959-1988	0,59G	0,36A	0,18A	-0,07D	-1,42D
1960-1989	0,57G	0,29A	0,17A	-0,07D	-1,43D
1961-1990	0,56G	0,31A	0,19A	-0,05D	-1,29D
1962-1991	0,57G	0,29A	0,16A	-0,06D	-1,30D
1963-1992	0,57G	0,34A	0,19A	-0,05D	-1,24D
1964-1993	0,57G	0,31A	0,19A	-0,05D	-1,21D
1965-1994	0,58G	0,33A	0,21A	-0,04D	-1,15D
1966-1995	0,59G	0,36A	0,25A	-0,01D	-1,05D
1967-1996	0,60G	0,35A	0,24A	-0,01D	-1,07D
1968-1997	0,62G	0,45A	0,28A	0,01D	-1,04D
1969-1998	0,63G	0,47A	0,29A	0,01D	-1,02D
1970-1999	0,64G	0,49A	0,30A	0,01D	-0,97D
1971-2000	0,62G	0,43A	0,28A	0,01D	-0,99D
1972-2001	0,63G	0,43A	0,30A	0,02D	-0,92D
1973-2002	0,65G	0,51A	0,35A	0,06D	-0,79D
1974-2003	0,64G	0,49A	0,34A	0,06D	-0,77D
1975-2004	0,67G	0,53A	0,38A	0,09D	-0,70D
1976-2005	0,65G	0,52A	0,37A	0,08D	-0,67D
1977-2006	0,64G	0,42A	0,37A	0,10D	-0,63D
1978-2007	0,63G	0,39A	0,37A	0,11D	-0,55D
1979-2008	0,65G	0,40A	0,40A	0,12D	-0,52D
1980-2009	0,68G	0,41A	0,42A	0,14A	-0,48D
1981-2010	0,67G	0,41A	0,42A	0,14A	-0,43D
1982-2011	0,68G	0,41A	0,42A	0,15A	-0,40D
1983-2012	0,67G	0,38A	0,42A	0,15A	-0,42D
1984-2013	0,68G	0,30A	0,41A	0,15A	-0,41D
1985-2014	0,68G	0,35A	0,42A	0,15A	-0,38D
1986-2015	0,69G	0,43A	0,47A	0,19A	-0,31D

1987-2016	0,70G	0,46A	0,49A	0,20A	-0,27D
1988-2017	0,68G	0,47A	0,49A	0,20A	-0,25D
1989-2018	0,68G	0,42A	0,48A	0,20A	-0,27D
1990-2019	0,67G	0,38A	0,49A	0,21A	-0,25D
1991-2020	0,68G	0,46A	0,52A	0,24A	-0,17D
1992-2021	0,68G	0,48A	0,53A	0,25A	-0,17D
1993-2022	0,68G	0,38A	0,52A	0,24A	-0,15D
1994-2023	0,68G	0,43A	0,54A	0,27A	-0,08D
1995-2024	0,67G	0,45A	0,57A	0,29A	-0,03D

4. PHYTOCLIMATE VERSATILITY

A location with high phytoclimatic versatility, i.e. with a wide range of compatible forest types with high PSI, is more likely to be less vulnerable, more resilient and more adaptive to disturbances derived from climate change, to the extent that these compatibilities are reflected in the composition of its forests, either naturally or assisted by enrichment or afforestation.

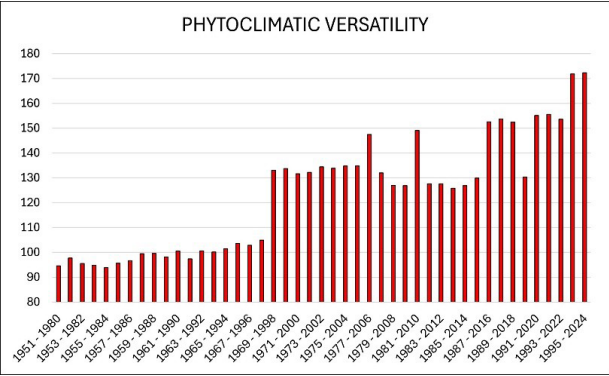
The phytoclimatic versatility of a station can be assessed through the following formula (Allué Camacho & García López, 2024), derived from the well-known Shannon Entropy Index (1948) to suitability indices instead of the numerical number of species for which it was originally devised, and for which it functions as an evaluator of biological diversity (Magurran, 1988; Keylock, 2005; Jost, 2006):

$$v_p = -10 \cdot \sum_{i=1}^k \left[\tilde{e}_p^{Ai} \cdot \ln \left(\frac{\tilde{e}_p^{Ai}}{\sum_{i=1}^k \tilde{e}_p^{Ai}} \right) \right]$$

Where $\tilde{e}_p^{Ai}$ is the normalised scalar or suitability index of the target point P with respect to forest tree cover i of the set of k canopies comprising the CAF model.

Applying this index to the set of positive PSI, a location will have high phytoclimatic versatility when not only the number of compatible main forest types with that station is high (richness), but also when all these compatible covers have a similar degree of suitability between them (proportionality) without there being an excessive dominance of the suitability to the factorial scope of a given forest type over the others, and the PSI are high (quantity). In summary, phytoclimatic versatility simultaneously assesses three concepts: richness, quantity and proportionality.

Figure 6. Evolution of Phytoclimatic Versatility values in 30-year mobile averages in Puerto de Navacerrada between 1951 and 2024.



After a long period of relative stability, the phytoclimatic entropy or versatility index shows an upward trend from the mean 1969-1998, according to the phytoclimatic approach of *Pinus sylvestris* monospecific forests to positions of greater compatibility with broad-leaved species at lower altitudinal levels (Figure 6).

5. CONCLUSIONS AND DISCUSSION

The joint and complementary application of the FVN and CAF phytoclimatic models makes it possible to translate, by means of appropriate transfer functions, shifts from environmental o suitability spaces. Integrating both models allows us to translate the dynamics of climate change into a biological language. This methodology allows to interpret estimations of future changes in temperature and precipitation more efficiently and translate them into vegetation language, by quantifications of the hosting capacities of environment and of the competitive relationships between the principal species in the forest. All this will also allow to improve the tools used to make assessments and make preventive and adaptative decisions in future scenarios of phytoclimatic uncertainty.

Our results suggest that for the moment there is no risk that the current oromediterranean forests of *Pinus sylvestris* will no longer be compatible with the climatic conditions of the study area, so dominant physiognomy would remain similar to the current.

However, the increase in thermoxericity seems to be move towards a gradual rupture of the exclusive *Pinus sylvestris* status. The continuous approach towards sub-nemoral phytoclimatic positions, typical of transitional broad-leaved deciduous forests between the Mediterranean and Eurosiberian biogeographic regions, suggests an altitudinal migration from the *Quercus pyrenaica* forests typical of medium altitudes in these mountains. The dominant evergreen broad-leaved forests in the basal zones are

also approaching, although still timidly, and only if the upward trend in thermoxeridity continues could they become compatible and even compete with *Quercus pyrenaica*.

The gradual approach, although still timid, to various forest types other than those of Scots pine, points to a trend in recent decades towards an increase in the phytoclimatic entropy or versatility of the study site, which, together with the notable wide-ranging phytoclimatic potential of Scots pine, means that the vulnerability of its high mountain forest stands in the Sistema Central, and specifically in the Sierra de Guadarrama National Park, is not particularly high at the moment, although this situation could change.

The high mountain Scots pine forests of the Sierra de Guadarrama are not endangered in terms of their existence in the near future, although their structure and composition, and therefore their physiognomy, could be modified by the irruption of *Quercus pyrenaica* as a secondary species, which would modify the composition, physiognomy and interspecific competition relations of these forests. This process, whereby several mountain coniferous forests would be enriched by the migratory contribution of broadleaved trees from lower altitudes, has been widely reported by several authors (i.e. Thuiller et al., 2006; Hotmeier & Broll, 2007; García López & Allué Camacho, 2010).

Field observations also point to this trend, as the altitudinal limit of the pure natural Scots pine forest is rising, and this, apart from considerations relating to change of use, possibly related to the climatic dynamics in the Central System, may corroborate the abundant natural regeneration of Scots pine at altitudes where it did not exist barely a century ago. Any case, these predictions should be handled with caution, as the climatic causes of the migration and altitudinal enrichment of tree species may overlap with other causes such as the abandonment of certain high mountain livestock farming practices (Gehring-Fasel et al, 2007).

Favouring broadleaved trees where they appear, initially in places with some kind of compensation (shelter and humidity, etc.) or even their introduction through enrichment planting could become an adaptive management practice that would favour the stability and viability of future stands in case that climate change accelerates, as well as the modification of forest planning instruments in terms of management objectives and the treatment to be given to accompanying species.

One of the limitations of this kind of models is that of their calibration, since the tree species considered in the CAF model have natural distribution areas that far exceed the Iberian Peninsula, which means that the climatic envelopes constructed do not encompass the whole species range. This limitation has already been pointed out in other works (Petit et al., 2005; Guisan et al., 2024). Another issue to be taken into account is the

intrinsic genetic or epigenetic adaptive capacity at the individual, community or species level, which may lead to changes in the shape of the initially calculated envelopes (Kremer, 2007; Lindner et al., 2010).

Ecosystems linked to oroarticoidean phytoclimates above the level of pine forests will reduce their surface area, which may lead to the loss of protected species associated with them. Given that this process cannot be fought against, it will be necessary to increase efforts to detect these species and their survival mechanisms in order to monitor and minimise the consequences of climate change.

REFERENCES

- Allué Andrade, J.L. (1990). Atlas fitoclimático de España. Taxonomías. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. 221 pp. Madrid.
- Allué Camacho, C. & García López, J.M. (2024). Los bosques naturales de castilla y león. Caracterización y potencialidades fitoclimáticas en un contexto de cambio climático. Ed. LIFE19/CCA/ES001181. 388 pp. Burgos. Descarga libre desde: <https://soriaforestadapt.es/fitoclim/>
- Condit, R., Aguilar, S., Hernández, A., Pérez, R., Lao, S. & Pyke, C. (2005). Spatial changes in tree composition of high-diversity forests: how much is predictable? 271-294 in E. Bermingham, C.W. Dick and C. Moritz (eds.), Tropical Forests: past, present and future. Univ. of Chicago Press.
- Davis, M.E., Shaw, R.G. & Etterson, J.R. (2005). Evolutionary responses to climate change. *Ecology*, 86: 1704-1714.
- García López, J.M. & Allué Camacho, C. (2010). Effects of climate change on the distribution of *Pinus sylvestris* L. stands in Spain. A phytoclimatic approach to defining management alternatives. *Forest Systems*, 19 (3): 329-339.
- García López, J.M. & Allué Camacho, C. (2011). Modelling phytoclimatic versatility as a large-scale indicator of adaptive capacity to climate change in forest ecosystems. *Ecological Modelling*, 222 (8), 1436-1447.
- García López, J.M. & Allué Camacho, C. (2012). A phytoclimatic-based indicator for assessing the inherent responsivity of the European forests to climate change. *Ecological Indicators*, 18: 73-81.
- García López, J.M. & Allué Camacho, C. (2013). Phytoclimatic Dynamics of Mediterranean Forests under Climate Change. A Case Study in a Southern European *Pinus sylvestris* L. Stand. *American Journal of Plant Sciences*, 4: 655-662.
- Gehring-Fasel J., Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2007). Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment. *J. Veg. Sci.*, 18: 571-582.
- Guisan, A. & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8: 993-1009.
- Guisan, A., Chevalier, M., Adde, A., Zarzo-Arias, A., Goicolea, T., Broennimann, O., Petitpierre, B., Scherrer, D., Rey, P.L., Collart, F., Riva, F., Steen, B. & Mateo, R.G. (2024). Spatially nested species distribution models (N-SDM): An effective tool to overcome niche truncation for more robust inference and projections. *Journal of Ecology*, 1-18.

- Holt, R.D. (1990). The microevolutionary consequences of climate change *Trends in Ecology and Evolution*, 5(9): 311-315.
- Holtmeier F.-K. & Broll G. (2007). Treeline advance-driving processes and adverse factors. *Landscape Online*, 1: 1-33.
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113 (2): 363-375.
- Keylock, C. (2005). Simpson diversity and Shannon-Wiener index as special cases of a generalized entropy. *Oikos*, 109: 203-207
- Kremer, A. (2007). How well can existing forests withstand climate change? In: Koskela, J., Buck, A. & Teissier du Cros, E., editors. *Climate change and forest genetic diversity: Implications for sustainable forest management in Europe*. Bioversity International, Rome, Italy. 3-17.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., García-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J. & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259 (4): 698-709.
- Magurran, A., 1988. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press. New Jersey.
- Malanson, G. P.; 2001. Complex responses to global change at alpine treeline. *Physical Geography*, 22: 333-342.
- Petit, R.J., Hampe, A., Cheddadi, R.; 2005. Climate changes and tree phytogeography in the Mediterranean. *Taxon*, 54: 877-885.
- Shannon, C.; 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Tech. Journ.*, 27: 379-423, 623-656.
- Thuiller, W., Laval, S., Sykes, M.T., Araújo, M.B.; 2006. Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe. *Diversity and Distributions*, 12: 49-60.

CAPÍTULO 7

USO DE HUMUS DE LOMBRIZ PARA REVITALIZAR SUELOS DETERIORADOS POR PRODUCTOS QUÍMICOS

Data de submissão: 25/06/2025

Data de aceite: 11/07/2025

Julian Rene Perdomo Ramos

Magister en TIC para la Educación
Escuela Militar de Suboficiales
Sargento Inocencio Chinca
Tolemaida – Nilo Cundinamarca
Colombia

<https://orcid.org/0000-0001-8695-4785>

Tania Paola Perdomo Ramos

Magister en Derechos Humanos y
Sistemas de Protección
Escuela Militar de Suboficiales
Sargento Inocencio Chinca
Tolemaida – Nilo Cundinamarca
Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-3455-4103>

José Francisco Machado Carrillo

Magister en Altos Estudios sobre
Terrorismo, Análisis y Estrategia
Escuela Militar de Suboficiales
Sargento Inocencio Chinca
Tolemaida – Nilo Cundinamarca
Colombia

<https://orcid.org/0000-0003-1663-6575>

Edison Arturo Perdomo Ramos

Magister en administración de
Organizaciones
Escuela Militar de Suboficiales
Sargento Inocencio Chinca
Tolemaida – Nilo Cundinamarca
Colombia

<https://orcid.org/0009-0009-2056-0228>

Jirley Vanessa Rojas Gómez

Magister en Educación Ambiental
Escuela Militar de Suboficiales
Sargento Inocencio Chinca
Tolemaida – Nilo Cundinamarca
Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-3828-987X>

RESUMEN: El proyecto de lombricultura tiene como objetivo revitalizar suelos deteriorados por el uso de productos químicos agrícolas, mediante la transformación de residuos orgánicos en abono orgánico, conocido como humus, utilizando lombrices californianas. La iniciativa se desarrolla, aprovechando los residuos alimenticios del comedor como fuente principal de alimento para las lombrices. El proceso se estructuró en varias fases: investigación sobre lombricultura y morfología de la lombriz, adecuación del terreno, construcción del lombricultivo, selección de alimentos apropiados (evitando ácidos, cítricos o alcalinos) y finalmente monitoreo, donde se evaluó la adaptación de las lombrices

y la eficiencia en la producción de humus. Como referencia se tomó la empresa de lombricultura ubicada en Tenjo (Cundinamarca), líder en el país en la producción de abonos orgánicos. Los resultados demostraron que este tipo de producción es una alternativa viable, económica y sostenible para el manejo de residuos orgánicos y la recuperación de suelos, sin requerir grandes inversiones ni cuidados especializados. Además, el humus obtenido mejora la estructura del suelo, aporta nutrientes esenciales y contribuye a reducir el impacto ambiental de los fertilizantes químicos. En conclusión, la lombricultura representa una solución práctica, ecológica y económica para la restauración del suelo, promoviendo una agricultura más responsable y sostenible.

PALABRAS CLAVE: abono; emprendimiento; humus de lombriz; sostenibilidad.

USE OF EARTHWORM HUMUS TO REVITALIZE SOILS DAMAGED BY CHEMICAL PRODUCTS

ABSTRACT: The vermiculture project aims to improve soils that are damaged by the use of chemical products in agriculture. It uses Californian earthworms to turn organic waste into natural fertilizer, called humus. The project uses food waste from the school cafeteria as the main food source for the worms. The project was done in several steps: first, research about worm farming and the biology of the worm; second, preparing the land; third, building the worm farm; then choosing the right food (avoiding acidic, citrus, or alkaline foods); and finally, monitoring how the worms adapt and how much humus they produce. The team used a worm farming company in Tenjo, Cundinamarca, as a model. This company is a national leader in making and selling organic fertilizers. The results showed that worm farming is a good, cheap, and sustainable way to manage food waste and improve soil. It does not need a lot of money or special care. The humus produced helps the soil, gives it important nutrients, and reduces the damage caused by chemical fertilizers. In conclusion, worm farming is a natural, eco-friendly, and low-cost way to fix damaged soil and support responsible farming.

KEYWORDS: fertilizer; entrepreneurship; worm humus; sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura ha sido necesaria para satisfacer las necesidades de la humanidad a través de los tiempos. Pero el desarrollo insostenible de la misma ha contribuido a muchos problemas cada vez más graves, sobre todo a partir de la revolución verde: erosión del suelo, desbalance de la materia orgánica, desbalances de nutrientes, contaminación por plaguicidas y formación de drenajes tóxicos, que generan problemas severos de salud también a los seres humanos. Todo esto ha llevado a proponer la Bioeconomía, que plantea la producción de materias en base a recursos renovables y/o reciclables, ya que la explotación de los recursos naturales disminuye drásticamente la producción de bienes como el agua, el suelo o la biodiversidad. (Marcano et al., 2021)

La proliferación nociva y descontrolada de herbicidas, insecticidas y fungicidas ocasiona grandes alteraciones en el suelo, impactando negativamente en los

microorganismos que están involucrados en su metabolómica, así como en los nutrientes esenciales para las plantas y en el ciclo de vida del suelo en sí mismo. Este tema es sin duda uno que se puede ampliar considerablemente, pero nos interesa más abordar cómo el uso de fertilizantes minerales y, en particular, los fertilizantes químicos afectan profundamente las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Además, es importante señalar que el uso indiscriminado de estas sustancias no solo genera problemas en el suelo, sino que también contamina el agua embalsada en represas que son utilizadas para el riego del campo, lo cual puede tener repercusiones graves en la calidad del agua y en la salud de los ecosistemas. (García et al. 2024).

Son múltiples los efectos adversos causados por las cosechas de los cultivos en diferentes ambientes del campo de un agricultor. La calidad físico-química del suelo se vuelve fundamental para poder realizar un cultivo exitoso en esta zona tan específica. Sin embargo, al estar la calidad del suelo deteriorada, se presentan distintas consecuencias que describiremos a continuación con un poco más de detalle. El uso de insumos minerales y químicos, tales como fertilizantes y plaguicidas, provoca grandes alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Estas alteraciones provocan obstrucción de poros, compactación del terreno, disminución de aire en el suelo y reducción de la permeabilidad. A medida que estos problemas se agravan, la capacidad del suelo para sostener los cultivos disminuye, impactando directamente en la producción agrícola y la calidad de los alimentos que cosechamos. (Mora, 2024)

“La lombricultura se inició en 1950 en EE. UU. con una especie conocida como la lombriz roja, siendo su verdadero nombre científico *Eisenia foetida*. Desde entonces se han realizado estudios que han tenido como resultados varios tipos de lombrices rojas cada vez más selectas, pero que en la actualidad los tipos más utilizados en la lombricultura son tres: *Eisenia foetida*, *Lombricus rubellus* y el rojo híbrido; de éstas la más difundida en el mundo es la lombriz *Eisenia foetida*, pertenece al phylum Anélidos clase Oligoquetos, explotada a nivel industrial por países como EE.UU., Japón, Italia, España y Chile principalmente”. Dionisio y Gilberto (1995). “Existen muchos tipos de lombrices, pero las que se usan en la lombricultura corresponde a la lombriz roja californiana, estas lombrices también se les conoce como anélidos o lombrices segmentadas pues su cuerpo está compuesto de muchos anillos. La lombricultura es una técnica agroecológica donde la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) procesa cualquier tipo de materia orgánica en lombricompost, sin el uso de elementos químicos o coadyuvantes, que pueden llegar a dañar los suelos. También se puede obtener subproductos, como humus, lixiviados, carne de lombriz rica en proteína para el consumo humano y animal (cerdos,

aves de corral, peces)” (Gonzales et al, 2019). Actualmente en el municipio de Tenjo-Cundinamarca (Colombia) cerca de Bogotá D.C. se encuentra ubicada la empresa más grande y pionera en el tema, logrando posicionarse en el país como una de las principales empresas productoras de lombricomposta, lombriz roja californiana y como asesora de lombricultura. su trayectoria hace aportes a diferentes beneficios tales como: Reciclado aproximado de 91.404 Toneladas de residuos orgánicos municipales y de las plazas de mercado. Produjo 800 Toneladas de composta para uso como alimento para sus criaderos. Ha implementado 1.523 Toneladas de (Humus) para uso como abono orgánico en el mejoramiento de cultivos de cultivos. Ha generado 2.849 litros de humus líquido para uso como fertilizante orgánico líquido en la producción de cultivos. Ha suministrado 32.174 Kilos (32 Toneladas) de pie de cría de lombriz para uso en nuevas explotaciones de lombricultura, presentando así 58 asesorías personalizadas en diseño, establecimiento y producción de explotaciones lombrícolas en diferentes territorios del país. participando en 7 ferias internacionales agro-expo a partir del año 2001, (Corpamag, 2021)

Este proyecto de lombricultura, busca crear conciencia en nuestros campesinos mediante el aprovechamiento de los residuos orgánicos como fuente principal de alimento para las lombrices, la cual produce el abono llamado “humus”. Y que, al implementarse en los suelos de cultivos, en las plantas, jardines, zonas verdes mejora las condiciones del suelo y el medio ambiente, como también mejora la calidad económica al evitar la compra de fertilizantes o abonos para el suelo.

El aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y agroindustriales, su transformación en productos y el uso de estos en los cultivos permiten hacer circular los nutrientes dentro del sistema productivo, contribuyendo a transformar la bioeconomía en el paradigma predominante en la agricultura del futuro. En el presente trabajo, se propone obtener el humus de lombriz como producto de la digestión anaeróbica a partir de residuos orgánicos

2. MARCO REFERENCIAL

“A lo largo de la historia los residuos sólidos orgánicos han jugado un papel muy importante para el medio ambiente debido a que estos fueron utilizados como abonos para la fertilización y conservación del suelo” (Gálvez, 2014) sin embargo hoy en día a través de la revolución de nuevos productos químicos como fertilizantes, fungicidas, pesticidas, herbicidas, insecticidas etc. Se presenta un impacto profundo en el daño al ecosistema, aire, agua y los suelos dejando a un lado la utilización de los residuos orgánicos, que a través del método de lombricultura que inicia su desarrollo “en los Estados Unidos a

finales de la década de los años cuarenta y principios de los cincuenta” (García et al, 2013) se ha utilizado de nuevo estos residuos como fuente de materia prima para las lombrices que producen un humus totalmente orgánico libre de contaminación.

“En los últimos 50 años, Polonia ha experimentado un deterioro sin precedentes del medio ambiente y la pérdida de biodiversidad. Emisiones de gases tóxicos, como el SO_2 , han alcanzado de 3 a 4 millones de toneladas anuales, afectando ampliamente la flora, la fauna y la salud humana. Casi todas las aguas superficiales están muy contaminadas. Más del 75% del agua en el Vístula, el río más grande de Polonia es inadecuada incluso para uso industrial. La contaminación ambiental, la pérdida y fragmentación del hábitat y la industrialización de las tierras agrícolas y los bosques han contribuido a la pérdida de biodiversidad. Hasta 2500 especies de plantas pueden estar en peligro ($\approx 25\%$ de todas las especies) y aproximadamente 228 ($\approx 2\%$) han sido extirpadas de Polonia. Las mayores pérdidas de flora y fauna se han producido en los ecosistemas de humedales. Entre las especies de vertebrados, 15 ($\approx 2\%$) se han perdido y más de 210 (otro 30%) están en peligro de extinción. Dada la incertidumbre económica actual, es difícil predecir las tendencias futuras de las emisiones contaminantes y sus efectos sobre la diversidad biológica de Polonia.” (Oleksyn y Reich, 1994).

Hoy en día se busca que todo lo que utilizamos para mantener nuestros cultivos, jardines, prados, no contengan químicos tales como fertilizantes, herbicidas, fungicidas y pesticidas con el fin de minimizar la contaminación por esta razón se están implementando los cultivos de lombrices ya que estos invertebrados son capaces de producir una clase de abono orgánico a través de la transformación de la materia orgánica proveniente de la descomposición de restos de animales o plantas que se depositan sobre el suelo. (factorhumus, 2022).

Según (Villalobos y González, 2023) la lombriz es muy antigua, su historia se remonta a tiempos inmemoriales. La lombriz, siempre ha estado ligada al desarrollo de la humanidad. El rol de las lombrices en el mejoramiento de las tierras de cultivo era bien conocido en el Antiguo Egipto. Una gran parte de la fertilidad del valle del Nilo dependía de estos animales. Por eso los faraones tenían previstos castigos muy severos a quienes las dañaran o contrabandearan.

El gran filósofo griego Aristóteles las definió certeramente como “los intestinos de la tierra”. Los romanos también supieron apreciar a las lombrices, aunque recién en el siglo XIX se explicó científicamente cuál era su verdadera función en el ecosistema.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. IMPORTANCIA DEL SUELO EN LA AGRICULTURA

En los últimos 40 años, el suelo ha adquirido una relevancia vital de suma importancia en función del desarrollo agrícola, y por lo tanto, ha experimentado una creciente presión ocasionada por las actividades agrícolas sobre el ambiente natural (Meneses, 2023). Esta presión se convierte en un concepto cada vez más familiar para los alumnos, al relacionarse con temas críticos como la concentración poblacional, la seguridad alimentaria y las repercusiones del cambio climático, junto con la escasez hídrica que enfrenta nuestro planeta. En relación con estos temas fundamentales, se han generado diversos sistemas liberadores de nutrientes, defensas de cultivos y mejoradores de suelos, todos desarrollados a partir de formulaciones químicas que buscan atender la creciente demanda de los sistemas de producción agrícola. Este enfoque se ha planteado dentro de un marco que parte de la producción agropecuaria, en donde se persiguen automáticamente mejoras significativas en la eficiencia del uso de los recursos y en el manejo de insumos, aunque aquellos que se alimentan de lo que puede tener respuesta también pueden generar efectos negativos sobre estos suelos (Berral et al. 2024). Esta situación se convierte en una condición que escapa al sistema, dado que, si se permite que continúe, el suelo rápidamente perdería su eficiencia tan valiosa. Si bien existen mejoras notables en la biodisponibilidad de nutrientes dentro de estos sistemas, la falta de coincidencia con el ciclo biogeoquímico que ocurre naturalmente en el suelo puede ser la clave que conduce a la sobre saturación. Esta sobre saturación resulta en la pérdida de sustratos a través de procesos como la lixiviación, o en el reemplazo de nutrientes que, aunque podrían alterar positivamente la biodiversidad, también podrían afectar negativamente las propiedades variadas del suelo en cuestión, alterando así la evolución cíclica fundamental del ciclo. Como resultado de contar con una oferta equilibrada en el suelo, fuera de los rangos de trabajo óptimos de humedad o del uso externo que se requiere en términos hídricos, se limita la pérdida de sustratos y se promueve que la microbiología del suelo pueda restringir y, en su caso, defenderse adecuadamente en la forma o función normal de sus diversas actividades. Este proceso es crucial, ya que permite evitar influencias fitotóxicas que pueden comprometer la salud del ecosistema agrícola. (Tarda, 2023)

3.2. CONTAMINACIÓN DEL SUELO

La contaminación del suelo, un problema creciente y alarmante en el ámbito mundial, afecta de manera directa y severa la salud de todos los organismos vivos, así como

del entorno en el que habitan. Se define como la acumulación de diversos contaminantes en la superficie terrestre, lo que genera un daño considerable en la calidad y producción del área que se ve afectada (Carliño et al. 2021). En lo que respecta a los suelos agrícolas, la introducción de compuestos orgánicos mediante la labranza, además de los derrames ocasionados por almacenamientos deficientes o la ruptura de insecticidas, se considera la principal fuente de esta contaminación. Varios investigadores de renombre coinciden en que muchos tipos de residuos sólidos, tales como aquellos derivados de alimentos, plásticos y pesticidas, permiten la mezcla incuestionable con el medio ambiente y la alteración significativa de la condición del área en cuestión. Estos residuos afectan considerablemente la salud del suelo. Los factores ambientales, como el oxidante, el agua de lluvia y la luz solar, son considerados claves en los procesos de transformación de esos compuestos contaminantes. Además, es importante resaltar que los plaguicidas, a partir de su degradación tanto biológica como hidroquímica, generan residuos nuevos que pueden ser de carácter más o menos tóxico, intensificando aún más el problema de la contaminación del suelo y sus efectos en el ecosistema. (Jiménez, 2022)

Existen diversos impactos debido a la presencia de productos químicos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. El mal uso de los sustratos de cultivo puede generar pérdida de su calidad, es decir, la eliminación del microbiota y/o descomposición del inóculo de plagas, deficiente aireación, entre otros (Rodríguez. et al. 2025). A través del uso del humus de lombriz, así como de otros biofertilizantes, se facilita la mejora del crecimiento y desarrollo de los cultivos, así como del aprovechamiento de las condiciones del suelo. Existen diversas investigaciones cohesivas en la acción de tipo edáfico y la utilización de diferentes humus de lombriz bajo diversas condiciones, mejorando considerablemente la sanidad y disponibilidad de alimentos para las plantas, facilitando el mayor aprovechamiento de los nutrientes, con ello el desarrollo inicial de la plántula, el crecimiento y desarrollo general del cultivo. (Intriago et al. 2024)

3.3. FUENTES DE CONTAMINACIÓN

En el mundo de hoy hay una constante preocupación por el medio ambiente y sus problemas, uno de los más graves es la contaminación, esto se debe a que muchas de nuestras actividades han venido contribuyendo a este problema.

Los suelos, sea cual sea su naturaleza, padecen frecuentemente contaminación generada por la actividad del ser humano que da lugar a daños irreparables, ya sea por la eliminación de residuos domésticos o industriales sin control alguno, la aplicación injustificada de pesticidas, herbicidas, fungicidas o productos agroquímicos que afectan

drásticamente el equilibrio natural del suelo. Las aguas de escorrentía provocadas por lluvias, olas, deshielos, etc., arrastran y depositan a la superficie del suelo todos estos productos y otros que no deseaban. (Urgilez, 2024)

3.4. LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA

Esta lombriz la podemos definir como “un híbrido descubierto en California a principios de los años cincuenta, de un intenso color rosado, que puede alcanzar una edad de 16 años. Alcanza su madurez sexual entre el segundo y tercer mes de vida y, a partir de entonces, produce aproximadamente cada 7-10 días una capsula con un número de embriones que oscila entre 2 y 20, los cuales salen del capullo al cabo de dos o tres semanas” Compagnoni y Putzolu (2018). La rapidez de su desarrollo es una de las ventajas que hoy en día son utilizadas de los criaderos a nivel mundial. Según (Somarriba y Guzmán, 2004) la principal función de la lombriz roja es la de transformar todas las grasas, proteínas y carbohidratos de los desechos orgánicos, en minerales que enriquecen el suelo, el cuerpo de la lombriz roja californiana está constituido el 80% de agua y el 20% de materia seca, la materia seca contiene entre 60 a 65% de proteína. Estas lombrices son muy prolíferas. Se aparean cada 7 días, poniendo de uno a tres huevos por lombriz cada diez días, refiriéndonos siempre a las lombrices adultas, siempre que se encuentren en óptimas condiciones.

3.5. HUMUS DE LOMBRIZ: DEFINICIÓN Y COMPOSICIÓN

El humus de lombriz es el resultado final de varios procesos que incluyen la digestión, la excreción y la transformación del material que se utiliza como alimento para las lombrices del género *Eisenia*. En su mayoría, este alimento proviene de fuentes orgánicas y de origen vegetal, que son digeridas y humificadas gracias a la mezcla de diferentes secreciones que provienen de la saliva y del intestino, así como el propio excremento de las lombrices. El resultado de estos procesos culmina en la producción de un tipo de materia orgánica de alta calidad, considerados como un fertilizante orgánico superior. Este humus es sintetizado principalmente a partir de vegetales que son ricos en nutrientes, lo que contribuye a su finura y acidez, y en conjunto se presenta como un residuo que se convierte en un producto de gran valor.

Se ha observado que el humus de lombriz actúa como un elemento nutritivo esencial, presentando un perfil de características que es muy similar al de la turba. Este material contiene alrededor de un 60-70% de carbono, así como solamente un 10-15% de nitrógeno. Esto demuestra que el grado de transformación del material orgánico es tan

elevado que este solo se limita a cumplir su rol como fuente de nutrientes, sin interferir en las propiedades físicas del medio en el que se aplica. Al inyectar el humus de lombriz en el suelo, se convierte en un elemento fundamental dentro del sistema físico del mismo, ya que mejora notablemente la textura del suelo, además de liberar diversos nutrientes minerales. Esto se traduce en una fuente estable de aire, agua y nutrientes, ayudando a mantener la humedad en el suelo. Además, el color del humus de lombriz también aporta un atractivo visual que beneficiará la plantación. (Chicaiza, 2023)

3.6. BENEFICIOS DEL HUMUS DE LOMBRIZ

El uso de humus de lombriz en suelos agrícolas se presenta como una alternativa ecológica muy valiosa que contribuye significativamente a aumentar no solo sus propiedades físicas, sino también químicas y biológicas. Es importante tener en cuenta que incrementos moderados en el volumen de los poros del suelo pueden mejorar notablemente la eficiencia de la captación de agua por parte de las raíces de las plantas. Esto no solo facilita el acceso a agua esencial, sino que también incrementa la aireación, mejora la circulación y promueve el drenaje del exceso de agua, generando así beneficios importantes en la actividad biológica del suelo. Además, el color oscuro y característico del humus de lombriz no solo es indicativo de su riqueza en nutrientes, sino que también ayuda a la retención de calor en el suelo. Este aumento en la temperatura del sustrato puede ser beneficioso para el desarrollo de microorganismos y la proliferación de raíces. Por otro lado, el incremento del lípido, en cualquiera de sus formas, tras el cambio de color que ocurre en el humus de lombriz, será sin duda suficiente para contribuir a tener tierras fértiles y altamente productivas, promoviendo así una agricultura más sostenible y amigable con el medio ambiente. (Barco et al, 2024)

La acción del humus de lombriz cubre también, y de manera integral, la absorción eficiente de agua, además de proporcionar mediante la neutralización de suelos ácidos a través de un intercambio químico que ocurre en ambos lados de las pequeñas montañitas formadas por limos, hojas, cenizas, o paja de caña de azúcar, que son ingeridas por la lombriz en el proceso natural de vermicompostaje (Intriago et al. 2024). Durante esta fase, las bacterias desempeñan un papel crucial, ya que transforman los materiales en sustancias químicas con diferentes características y ricas en colonias diversas de microorganismos. Estos microorganismos, a su vez, van desgastándose progresivamente, liberando formas biogenas y disoluciones que son conducidas hacia las raíces de las plantas, las cuales serán asimiladas y utilizadas eficazmente por ellas en el proceso vital de formarse como un nuevo tejido saludable y vigoroso.

3.7. COMPOST VS. HUMUS DE LOMBRIZ

El Compost es el interesante resultado de la descomposición de materiales orgánicos variados que ocurre en presencia de aire fresco y humedad adecuada. Aunque su uso ha sido parte de la práctica agrícola durante siglos por el ser humano, en la actualidad se promueve de manera activa y se utiliza el adecuado proceso de su elaboración, en el cual los residuos orgánicos que provienen de diferentes fuentes son cuidadosamente adicionados en capas alternas. Después de varias semanas y meses de este cuidadoso proceso, se obtiene el valioso producto final al cual se le han ido adicionando en forma regular agua, aire y humedad. Este es considerado el resultado orgánico por excelencia en el manejo Agroecológico de los cultivos, a pesar de que no siempre se cuenta con la certeza absoluta sobre sus beneficios (Sánchez, 2022). Esto corre el riesgo de subestimar la importancia y el rol de otros enmendantes igualmente importantes, como es el caso del Humus de Lombriz, que ha sido elogiado en diferentes partes del mundo. Esto sucede a pesar de que poco se ha profundizado de manera científica o práctica en los aportes específicos de este enmendante respecto al óptimo manejo de cultivos, lo cual es esencial para un entendimiento integral del tema.

El Humus de Lombriz es un resultado fascinante de la biotransformación llevada a cabo por las lombrices, que se produce a partir de la digestión compleja de la materia orgánica y agua en presencia de las enzimas digestivas, junto con las secreciones que provienen de las paredes intestinales de estos organismos. Este proceso de digestión es extraordinario ya que da como resultado la generación de dióxido de carbono y agua, al mismo tiempo que permite que las lombrices peguen o enlacen partículas primarias o estructuras oligoméricas presentes en el material que han consumido. Por lo tanto, estamos hablando de un material realmente biogénico que tiene un origen natural y que está intrínsecamente ligado a la interacción de estos seres con su entorno. En resumen, se puede afirmar que “Las lombrices, al igual que otros organismos vivos, sintetizan compuestos biogénicos en su propio nombre, favoreciendo así la continuidad de los círculos de la vida.” Este elaborado material orgánico que resulta del proceso de digestión constituye un porcentaje que varía entre el 80 y el 95 % de la forma sólida del humus, y esto depende del rango de humedad relativa del ambiente atmosférico en el que se encuentre. En cambio, al comparar este material con los elementos inorgánicos que son típicos en la naturaleza, se observa que el humus NO genera un ambiente propicio para la vida de los seres vivos, a pesar de que este material sí puede inducir, a través de procesos físicos más que bioquímicos, una reactivación pasiva (Pico, 2022). Esto se debe a que el humus es el resultado del impacto de una variedad de agentes, que abarcan desde los

biológicos y químicos hasta los físicos, todos los cuales juegan un papel en la renovación y mantenimiento del ecosistema.

Tabla 1. Comparativo entre el Humus de Lombriz y el Compost.

Criterio	Humus de Lombriz (Vermicompost)	Compost
Proceso de producción	Producido por la digestión de materia orgánica por lombrices, especialmente <i>Eisenia foetida</i> . (Domínguez & Edwards, 2011)	Producido por descomposición aeróbica natural de residuos orgánicos mediante microorganismos. (FAO, 2015)
Tiempo de producción	Más rápido (2 a 3 meses) debido a la acción directa de las lombrices. (Atiyeh et al., 2001)	Puede tardar de 3 a 6 meses o más, dependiendo del tipo de residuos y manejo. (Rynk, 1992)
Organismos involucrados	Lombrices y microorganismos simbióticos (bacterias, actinomicetos, hongos). (Lazcano & Domínguez, 2011)	Solo microorganismos aerobios (bacterias y hongos). (FAO, 2015)
Contenido de nutrientes	Alto en nitrógeno, fósforo y potasio disponibles, y enzimáticamente activos. (Domínguez & Edwards, 2011)	Contiene nutrientes, pero en menor disponibilidad inmediata para las plantas. (Rynk, 1992)
pH del producto final	Neutro a ligeramente alcalino (6.5 - 7.5), ideal para la mayoría de cultivos. (Lazcano & Domínguez, 2011)	Variable, depende de los materiales utilizados; puede ir de 5.5 a 8.0. (FAO, 2015)
Textura y olor	Textura fina, color negro y sin olor desagradable. (Edwards et al., 2004)	Textura más gruesa, olor terroso si está bien hecho, pero puede tener malos olores si está mal manejado. (FAO)
Aplicación en el suelo	Mejora la estructura del suelo, promueve la vida microbiana y estimula el crecimiento vegetal. (Atiyeh et al., 2001)	Aumenta la materia orgánica y mejora la retención de agua, pero de forma más lenta. (Rynk, 1992)
Costo de producción	Requiere más infraestructura y manejo (lombrices, camas, humedad constante). (Edwards et al., 2004)	Menor costo; puede hacerse en pilas al aire libre con herramientas básicas. (FAO, 2015)
Impacto ambiental	Alto beneficio: recicla residuos, mejora suelos y evita químicos. (Lazcano & Domínguez, 2011)	También positivo, pero puede emitir gases si se maneja mal. (Rynk, 1992)

Nota: comparativo detallado entre el humus de lombriz y el Compost, se pueden evaluar las características principales de abonos orgánicos, los recursos disponibles, objetivos agrícolas y compromiso con el medio ambiente. Fuente del Autor.

4. MATERIALES Y MÉTODOS (METODOLOGÍA)

El estudio se realizó por medio de un enfoque metodológico cuanlitativo para la implementación de un lombricultivo para la producción y extracción de humus con el resultado de fortalecer los suelos desgastados por insumos químicos. La producción de lombricomposta es un proceso biológico que transforma materia orgánica a través de la acción de las lombrices de tierra, utilizando procesos biológicos y físicos sin intervención de los seres humanos. Las lombrices son organismos formados por segmentos que se

encuentran en la superficie del suelo, siendo los más comunes los del género *Eisenia* *fetida*, para este caso se utiliza la lombriz californiana, siendo esta una de las más utilizadas debido a su alta eficiencia de transformación de materia orgánica en su medio interno (Martínez, et al, 2025)

Se inicio con la fase I, la cual fue llamada indagación, en esta fase se hicieron consultas sobre lombricultivos ya creados y también sobre la morfología de la lombriz, para poder conocer más sobre ellas y la manera en que la cultivan, La importancia de las lombrices en el proceso de vermicompostaje radica en su papel fundamental como agentes descomponedores. Sin embargo, no todas las especies de lombrices están igualmente capacitadas para llevar a cabo el proceso de vermicompostaje. Hay que tener en cuenta para su selección el aprovechamiento del material a procesar como alimento, el desarrollo óptimo bajo criterio bioclimático local, la velocidad de reproducción y multiplicación, comportamiento biológico, eficiencia alimenticia y productividad, entre otros factores. Entre las especies más relevantes utilizadas a nivel mundial como organismos transformadores de materia orgánica se encuentran: *Lumbricus terrestris*, *L. rubellus*, *Eudrilus eugeniae*, *Eisenia fetida*, *Perionyx excavatus* y *Danotus subterminalis*. (Córdova, 2019)

También se realizó un presupuesto para la adquisicion de materiqales como los son: las puntillas, las tablas, el plástico, una polisombra, todos estos materiales tienen un costo aproximado de \$40.000 pesos, hay que tener en cuenta que todos estos materiales son importantes a la hora de desarrollar nuestro criadero de lombrices y que son de fácil acceso.

La vermicompost está compuesta principalmente por humus de lombriz, substancia que se origina de la degradación de la materia orgánica y es obtenida de los excrementos intestinales de las lombrices. Este producto, también se le conoce como vermicompos, vermicompost, humus, lombricomposta u otros nombres, lo que genera confusión en la terminología empleada de acuerdo al beneficio que conlleva la práctica. A fin de que el proceso de obtención de hummus de lombriz se desarrolle de la mejor forma posible es fundamental tener en cuenta el tamaño y la edad de las lombrices seleccionadas, el material vegetal y alimento que se dará a las lombrices como sustrato, así como la calidad del mismo, el espacio utilizado para el funcionamiento del sistema donde permanecerá la microbiota en un tiempo apropiado, las condiciones de humedad, temperatura y aireación que debe tener el sistema y la frecuencia y forma de recolección del producto nutritivo trabajado por estos organismos. (Alescano y Muñoz, 2023)

En la fase II, fue llamada adecuación del terreno, se hizo una búsqueda de un sitio óptimo para realizar el lombricultivo el lugar utilizado debe estar indirectamente a los rayos del sol ya que estos pueden afectar a el cultivo también hay que tener en cuenta que el terreno sea plano para que facilite la construcción del criadero.

El vermicompostaje se puede realizar en una amplia variedad de sustratos orgánicos que, al deteriorarse, proporcionan agua y alimento a las lombrices. Esto genera temperaturas adecuadas para el desarrollo de las lombrices y de los organismos que ayudan a degradar los residuos. La calidad del humus va a depender de qué tipo de material se utilice y de cómo se maneje el proceso de vermicompostaje. Ocurre la transformación de los residuos orgánicos, por lo menos en los primeros días, proporcionándoles oxígeno y humedad para su degradación. El vermicompostaje se lleva a cabo en sustratos orgánicos, es decir, residuos de origen vegetal, animal o mixtos; los materiales deben estar libres de plaguicidas, venomatos y contaminantes de origen físico o químico. Los residuos provenientes de la agricultura, como elementos fibrosos, son importantes y provechosos en el proceso de vermicompostaje. Son ricos en celulosa y lignina que permiten a las lombrices ayudarles a degradarse; además, permiten mayor infiltración de aire evitando el mal olor que se origina cuando la materia prima se encuentra en mal estado. Ejemplos de residuos fibrosos son, cañas de azúcar, pastos, carrizos, restos de podas, entre otros. (Merino, 2024), así mismo los alimentos que se dieron a las lombrices debían estar libres de ácidos como limones o toronjas.

En la fase III, fue llamada construcción, se tomaron 6 tablas donde 2 de ellas fueron cortadas con medidas diferentes, después se procedió a apuntillar cada una de las tablas armando unos cajones rectangulares, donde se tuvo en cuenta la generación de las condiciones óptimas para el desarrollo de la lombriz.

La temperatura, humedad y aireación son fundamentales para la producción de humus, debido a que estos factores afectan la proliferación de los organismos que llevan a cabo el proceso de descomposición y posterior producción de humus: las lombrices y microorganismos. La temperatura óptima para el crecimiento de lombrices es de aproximadamente 20 °C. Para evitar que la temperatura dentro del sistema se eleve demasiado se sugiere la cantidad adecuada de materiales y una correcta aireación por ello se utilizó la poli sombra material que permite el paso del aire y protege de los rayos solares. La humedad, por su parte, debe encontrarse en una cantidad suficiente para que las lombrices puedan desarrollarse y realizar su trabajo, además de garantizar las condiciones necesarias para el buen funcionamiento de los microorganismos, que son

los organismos encargados de realizar la descomposición natural previa a la producción de humus. (Guevara, 2024)

La correcta aireación del sistema previene la compactación del material y la aparición de olores desagradables. El aire caliente tiende a escapar hacia arriba y el aire fresco a entrar en la parte inferior, por lo que es natural que haya un movimiento para airear lo que es importante cuando se logra que tanto aire se mantenga en el sistema. La cantidad de lombrices, materiales y humedad impactará la cantidad de aire que se contará en forma natural, en un inicio se deberá realizar un movimiento o aireación estrictamente manual, posteriormente el sistema se aireará con la cantidad suficiente por los mecanismos naturales. (Monroy y Esquivel, 2021)

En la fase IV, fue llamada elaboración de camas y sustratos, se realizó con 3 tipos de sustratos con el fin de obtener los resultados e identificar cuál es el más efectivo y más viable para utilizar, también se realizaron los soportes para las canastillas.

Como hemos indicado, las lombrices tienden a salir de su universo físico, el humus de lombriz, para migrar a espacios más amplios, donde puedan encontrar mayor profundidad de suelo. Esto es debido a su biología; una bocanada de aire al desplazarse y/o nutrir su organismo; la migración a nuevo lugar tiende a asegurar su resistencia, eso hace que sus funciones sean más eficientes. Para evitar que eso suceda y afecte directamente la producción de humus de lombriz hay que encontrar la posición ideal, la cual se entierra realizando filas en “v” honda a 20 cm. En el fondo de la fila profunda se lo cubre y se lo rodea con el material necesario para irse alimentando hasta su consumo, luego cuando se debéis ir formando nuevos piños o colmenas. (García, 2024)

La humedad es un factor muy importante para la biología de la lombriz, debe de estar en un balance bueno, porque un exceso al igual que una baja, afectará el desarrollo de la lombriz, ambos casos generan condiciones adecuadas para el desarrollo de enfermedades y/o ataque nocivo de patógenas y competidores. Los materiales a usar pueden variar en el equilibrio de al menos 3 semanas resultando de la conservación de fuerzas vivas y/o el desarrollo de enfermedades y/o ataque de competidoras nocivas. Para unos mejores resultados evitar el uso de chala, o restos de esta en el humus para no entrar en competencia núcleos-espinas, luego al abono. (Guevara, 2024)

En la fase V, llamada monitoreo, se le hizo un seguimiento a la lombriz, para saber que sustrato tuvo mejor adaptabilidad en las lombrices y cuál es el que produce mayor cantidad de humus, así mismo se realizó pruebas de fertilización del suelo con productos como la palma de plátano.

El Humus de Lombriz ha demostrado ser un fertilizante altamente eficaz orientado al mejoramiento y restauración de los suelos que se encuentran degradados,

presentando características que lo hacen indispensable para cualquier agricultor. Su eficacia se manifiesta claramente tanto en el cultivo propio de este abono orgánico, como también en los suelos que han recibido el tratamiento del humus, tales como plantaciones agrícolas y de madera, surcos, fajas costeras junto a caminos, huertas, jardines y muchas otras áreas verdes. La aplicación de Humus en estos cultivos ha demostrado ser un gran nivelador nutritivo, logrando, en el caso de otras producciones agrícolas, no solo un mejor transporte, sino también un correcto enraizamiento de las plantas. Su uso se ha presentado eficazmente en montañas y laderas aledañas a los cultivos y ha fomentado, a su vez, un mejor drenaje, evitando el derrumbe y secado de pastizales, el Humus que ha colmado el circulito ha permitido que el agua residida no se evapore rápidamente, logrando su fijación en la raíz del cultivo para su rápida y eficaz absorción. Esto ha llevado a un notable incremento en la productividad de los suelos y ha generado un ambiente más saludable para el crecimiento de las plantas y el desarrollo de la biodiversidad en estos ecosistemas.

Figura 1. Creación del Lombricultivo.



Nota: se identifica los materiales, las lombrices y el ambiente propicio para el lombricultivo. Fuente del Autor.

Figura 2. Fertilización con Humus de lombriz en matas de plátano.



Nota: fertilización de los suelos desgastados por procesos químicos abonados con humus de lombriz en matas de plátanos. Fuente del Autor

5. RESULTADOS

La implementación del humus de lombriz en la agricultura sostenible enfrenta varios retos y desafíos, siendo uno de ellos la escalabilidad del proceso. Esto es un asunto delicado, ya que, aunque el proceso de elaboración y uso del humus de lombriz en el suelo es sencillo y de bajo costo, para determinar la viabilidad del negocio se vuelve efectivamente difícil si sus efectos se pueden medir y si generan beneficios. Para esto se necesita información de campo que se puede obtener directamente del productor a aplicar en sus propiedades de cultivo y/o de atención de sus animales. Con esta información, se pueden realizar las proyecciones reales, la de cultivos que realmente pueda obtener o las producciones de establos que la solución pueda potenciar con certeza real. Este trabajo podría tomar tiempo y recursos del productor, pero a su vez podría traer grandes beneficios. Para aplicar rápidamente la solución e ir evaluando su impacto en la producción de cultivos y/o producción animal se puede tomar la definición de pequeños paños de evaluaciones controladas, esto es se definen unos terrenos que a su vez están en un campo de grandes extensiones en donde se puede gestionar la solución a escala y/o distribuir a un gran número de productores a uno de cada estos paños o al área de su emplazamiento. Esto puede significar ahorro y resultados evidentes demostrativos hacia los demás productores.

Por otro lado, el humus de lombriz competitivamente permite un buen precio de adquisición porque es de fácil producción a bajo costo, lo podemos caracterizar como un producto versátil que se adapta diferente a los cultivos y que permite acondicionar el suelo mejorando simultáneamente una amplia gama de propiedades físicas, químicas, biológicas y fisiológicas. El cultivo a mejorar se mezcla con el humus y se aplica a los cultivos específicos. Su producción estimulará el resultado económico en los cultivos y/o en la producción animal llevando a alcanzar el retorno esperado, nutrir los suelos desgastados por productos químicos.

6. DISCUSIONES

La presencia de nutrientes en el suelo es un requisito fundamental e indispensable para la producción agrícola de calidad, ya que es uno de los factores más importantes que influye en la actividad biológica y el crecimiento saludable de las plantas. Para obtener un suelo fértil y productivo, inicialmente es necesario conocer a fondo el contenido de los diversos elementos presentes y aplicar un material enmiendado que pueda efectivamente aumentar las reservas y la calidad del suelo. La materia orgánica, que incluye restos de plantas y descomposición de microorganismos, es uno de los componentes más importantes y cruciales de la agricultura sostenible. Además, es una de las principales características que se encuentran en los suelos con alta actividad biológica y diversidad microbiana, lo que contribuye considerablemente al mejoramiento de la estructura del suelo y al potencial productivo de las áreas agrícolas. (Bonilla, 2024)

La conversión de materia orgánica en humus puede aumentar significativamente los nutrientes disponibles en el suelo. Este proceso de conversión es vital para la salud y fertilidad del suelo. El humus favorece el aumento de los niveles de fertilidad del suelo debido a la alta disponibilidad de nutrientes principales que aporta. Al añadir directamente sustancias húmicas al suelo, se potencia de manera notable: el potencial fisiológico de la capacidad de intercambio catiónico, que es esencial para mantener un equilibrio de nutrientes en el suelo; la disponibilidad tanto de macronutrientes como de micronutrientes, los cuales son necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas; y el tiempo de estabilización de la materia orgánica, lo que lleva a un aumento en la acumulación de varios nutrientes en el suelo y contribuye a un ecosistema más robusto. El humus puede producir un efecto dual en lo que respecta a los nutrientes: puede disminuir el lixiviado, que es la pérdida de nutrientes por el agua que se filtra a través del suelo, o generar efectos opuestos, como el aumento del lavado de nutrientes minerales que son cruciales para las plantas. Existen informes sobre algunos efectos beneficiosos que son contribuidos

directamente por los componentes del humus, que, debido a sus particulares propiedades, pueden reemplazar nutrientes que se han perdido por el proceso de lixiviado. Además, las interacciones físico-químicas entre la materia orgánica del suelo y los cationes y aniones metálicos pueden llevar a una adecuada fijación de los iones en el suelo y, en caso de ser lixiviados, pueden encontrarse en una forma que esté disponible para ser absorbidos, facilitando así una mejor absorción radicular por las plantas y, por ende, promoviendo el desarrollo sano y vigoroso de la vegetación. (Enriquez, 2021)

Tabla 2. Composición del Humus de lombriz.

COMPOSICIÓN GARANTIZADA	
Nitrogeno (N)	1.8%
Fósforo (P2O5)	4.5%
Materia Orgánica	51.0%
Carbono Orgánico Oxidable	29.1%
Relación Carbono / Nitrogeno	15.9
Cenizas	28%
Humedad Máxima	20.0 - 35.0%
pH	6.75
Densidad (gramos/cm)	0.49
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	63.6 mEq/100g
Capacidad Retención de Agua	125.0%

Nota: identificación de los componentes finales del humus de lombriz. Hernández (2015)

En la actualidad, los métodos de agricultura sostenible se han reivindicado frente a un modelo intensivo que deteriora el medio ambiente y afecta a animales y personas. La agricultura sostenible aboga por integrar a la agroecología, donde, por una parte, se apela a la soberanía alimentaria y, por otra, a la preservación del medio ambiente, minimizando los impactos negativos que puede generar el desarrollo de la actividad agrícola. En la actualidad hay algunos grupos de trabajo de participación público-privada, que lideran la implementación de la agricultura agroecológica y su investigación, permitiendo evaluar las capacidades de los sistemas de producción agroecológicos, y formar así los grupos estratégicos, concebidos como granjas o empresas agrícolas sostenibles. (Ungucha et al. 2024)

Se constata el crecimiento en las ventas de productos orgánicos en todo el mundo, en datos que aportan de la rama de productos agrícolas orgánicos procedentes de los países en desarrollo en comparación con aquellos proveniente de mundo desarrollado. Los productos orgánicos siguen las normativas del comercio agrícola mundial y son propicios porque satisfacen a un público consumidor preocupado por la

calidad y variedad de los alimentos, el respeto a los trabajadores, así como su huella ecológica. Según algunos, el desarrollo y/o la orientación de los mercados de alimentos hacia economías menos intensivas en la utilización de insumos generados actualmente son favorables al mantenimiento de las tradiciones locales y, posibilitan, a través del incremento en el consumo de los productos agroecológicos, su mayor inclusión en la agricultura comercial. (Ávila, 2022)

La fertilización de suelos con humus de lombriz es una práctica muy común, con su experiencia lograda en el uso específico de humus de lombriz en siembra, fertilización y revitalización de suelos urbanos además de paisajismo. Para los usos específicos antes mencionados, el contenido precisamente encontrado de nutrientes que son objetivo de la fertilización de humus de lombriz permitiría aportar el total de la fertilización recomendada cuando los humus de lombriz se aplican de 0.30 o más en una sola aplicación de un año para otro, al asistir además de las aplicaciones de fertilización estándar utilizada en esta extensiva fertilización área. (Guillén, 2022)

El manejo de cultivos ornamentales se recomienda que en la etapa de preplantación de estos se aplique los 5m³ de humus de lombriz en pocas a varias semanas antes de la siembra, aprovechando los sistemas de riego de las mismas que favorecen el contacto físico del humus con la raíz para prevenir la compactación del humus en el ambiente radicular. En el caso de cultivos de flores cortadas, se recomienda ser aplicados completamente inundándolos con el humus frente a todo el sistema radical de la planta reproductiva o flores cortadas en contenedores que permiten el contacto visual y físico más adecuado entre la raíz y el substrato. (Balleux, 2022)

7. CONCLUSIONES

La degradación de los suelos, como efecto de decisiones y prácticas no adecuadas, se manifiesta como un riesgo latente y creciente para la seguridad alimentaria mundial. La situación actual exige que las decisiones que se adopten sean críticas y relevantes para garantizar que las próximas generaciones cuenten con los recursos necesarios para afrontar la demanda de alimentos y otros productos fundamentales para la vida y el bienestar de las sociedades humanas. Por este motivo, en el ámbito de la investigación, se ha producido un aumento significativo en los esfuerzos para obtener un mejor conocimiento de las características y dinámicas de los suelos, así como para aportar soluciones efectivas que favorezcan su recuperación o mejora sostenible. En este sentido, se han presentado diversas alternativas y enfoques, como el uso de fertilizantes de origen sintético, que, aunque pueden ser efectivos, también plantean preocupaciones

sobre su impacto ambiental. Asimismo, se está promoviendo el empleo de insumos de origen natural y sostenible, de múltiples orígenes, entre los cuales se encuentran los fertilizantes de origen biológico, que representan una opción viable y ecológica para la fertilización de los suelos y la revitalización de su capacidad productiva.

Teniendo en consideración lo anteriormente planteado, el uso de humus que proviene de los excrementos de las lombrices es una opción viable y altamente beneficiosa como producto para la revitalización de suelos que han sido deteriorados a lo largo del tiempo debido a la carga y acumulación de productos que afectan negativamente el entorno natural. La rápida disponibilidad de los nutrientes esenciales que ofrece una dosis de humus de lombriz aplicado a los suelos, actúa de manera eficiente al cerrar las brechas de carencias que los cultivos enfrentan, al menos en un período corto de tiempo, lo que permite tanto el fortalecimiento como el crecimiento adecuado de las especies vegetales. Tal premisa puede ser utilizada en suelos cultivables que han sido sometidos a intensas labores para su producción y el uso frecuente de insumos de tipo sintético que, a la larga, pueden resultar perjudiciales (Palacios, 2025). Entre las condiciones que favorecen el uso de este insumo natural y orgánico, destacan los estilos característicos de su aplicación, así como los beneficios adicionales que se pueden obtener en términos ambientalistas o la producción de un abono/insumo terrestre correspondiente a dicho reciclaje; lo cual proporciona un valor agregado significativo a dicho proceso, impulsando no solo la productividad agrícola, sino también promoviendo la sostenibilidad y la salud de nuestros ecosistemas.

Se recomienda aplicar el humus de lombriz mediante una técnica de abono líquido, ya que este método también favorece una acción continua y controlada de liberación de nutrientes en el suelo. Por lo tanto, inyectar el humus de lombriz se constituye como uno de los abonos orgánicos más ricos en nutrientes, rivalizando incluso con sustancias como combinaciones minerales y secuencias químicas. Estos aportes son necesarios para la fertilización de cultivos, siendo especialmente efectivo en aquellos que requieren de un alto contenido de humedad y nutrientes. Sus beneficios se reflejan en el crecimiento vigoroso de las plantas, especialmente en aquellas que son parte de cultivos energéticamente híbridos que también se ven favorecidos por un adecuado manejo del carbono en las hojas y una eficaz circulación de agua en el suelo (Enriquez, 2021)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alescano C, J. A. y Muñoz C, Y. N. (2023). Efecto del fertilizante orgánico “Humus de Lombriz” en el crecimiento y productividad en el cultivo de zucchini (*Cucurbita Pepo* L.), en el sector Chipe Hamburgo utc.edu.ec

- Atiyeh, R.M., Edwards, C.A., Subler, S., y Metzger, J.D. (2001). *Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium*. Bioresource Technology, 78(1), 11–20.
- Ávila Mamani, F. L. (2022). Sistemas de gestión de la calidad en productos agroecológicos. ull.es
- Balleux, J. M. (2022). Acciones para el Aprovechamiento Agroecológico de los Residuales Sólidos Orgánicos en el Parque Zoológico Nacional. accesoabierto.uh.cu. uh.cu
- Barco J, C. D., Guerrero R, S. B., Romero A, T. F., y Tello C, C. C. (2024). Modelo Prolab: Humus de lombriz potenciado con nutrientes orgánicos de nitrógeno-potasio-fósforo (NPK) en presentación grow cubes, una propuesta sostenible para mejorar la calidad de los cultivos. pucp.edu.pe
- Berral-Ortiz, B., Cáceres-Reche, M., Romero-Rodríguez, J. M., & Alonso-García, S. (2024). Programas de entrenamiento y recursos tecnológicos en la mejora de la comprensión lectora en educación primaria. Información tecnológica, 35(2), 49-60. scielo.cl
- Bonilla Winso, B. J. (2024). Uso de agrobiodiversidad en la producción sostenible en la agricultura. utb.edu.ec
- Compagnoni, L., & Putzolu, G. (2018). *Cría moderna de las lombrices y utilización rentable del humus*. Parkstone International.
- Carliño, M. J., Segura, F. O., & Iglesias, J. C. (2021). 5.-Contaminación ambiental y su influencia en la salud. ReNaCientE-Revista Nacional Científica Estudiantil-UPEL-IPB, 2(1), 75-90. investigacion-upelipb.com
- Córdova, M. R. (2019). Remoción de contaminantes de las aguas mieles del café, utilizando lombrices Eisenia foetida y Lumbricus terrestris, Moyobamba 2019. repositorio.unsm.edu.pe. unsm.edu.pe
- Corpamag, Corporación Autónoma Regional Del Magdalena (2021).** Corpamag-Autoridad Ambiental del Magdalena - Inicio.
- Chicaiza, M. V. D. C. (2023). Humus de Lombriz Roja Californiana (Eisenia fetida) a Partir de la Combinación de Residuos Orgánicos. Erevna: Research Reports. revistaerevna.com
- Domínguez, J., y Edwards, C. A. (2011). *Biology and Ecology of Earthworm Species Used for Vermicomposting*. En: **Vermiculture Technology**. CRC Press.
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., y Sherman, R. (2004). *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press.
- Enriquez Haro, J. T. (2021). *Los abonos orgánicos: ventajas y desventajas en los cultivos hortícolas de la costa ecuatoriana* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2021).
- FAO (2015). *Manual de Compostaje del Agricultor*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Factor Humus. Abonos y fertilizantes para cultivos. (2022). Abonos y fertilizantes para cultivos - Factor Humus.
- Gálvez V, A. (2014). Reciclado de los residuos agrícolas de la empacadora total produce mediante la técnica de lombricultura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla <https://hdl.handle.net/20.500.12371/6736>

García, B. A. C., Rangel, C. C. R., y Suárez, D. M. T. (2024). Efecto de los agroquímicos en la actividad enzimática del suelo agrícola: Una revisión bibliográfica. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 15(2). unillanos.edu.co

García Luna, J. (2024). Microbiota, macrobiota y fertilidad en función del sistema de uso del suelo. repositorioinstitucional.buap.mx. buap.mx

García, M., Espinosa, M. G. N., López, C. N. V., y López, J. V. (2013). Elaboración de abono orgánico a base de lombriz roja californiana. *Estudios Agrarios*.

Gonzales, D. A., Gómez, J. A., Martínez, A., Sotelo, M. J. (2019). Lombricultura: proyecto pedagógico para buenas prácticas ecológicas para la conservación de nuestro planeta, en la granja experimental cica, Cimitarra – Santander. *Revista de Ciencia Tecnología Sociedad y Ambiente*

Guevara V, L. F. (2024). Análisis de crianza y reproducción de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). utb.edu.ec

Guillén Z, A. (2022). Fertilización con humus de lombriz (*Eisenia foetida*) en la producción del cultivo de papa *Solanum tuberosum* l) Variedad Canchan INIA Chuquibambilla-Grau. unamba.edu.pe

Hernández D.,(2015).Elaboración de abono orgánico a base de lombriz roja californiana. Instituto tecnológico de la cuenca del Papaloapan.

Intriago, D. A. M., Rosado, V. F. M., & Arteaga, B. R. A. (2024). Influencia del humus de lombriz en la calidad de los suelos agrícolas: un estudio de caso. *Didasc@ lia: Didáctica y Educación*, 15(3), 388-404. unirioja.es

Jiménez A, C. (2022). Uso de agroquímicos en el cultivo de papa y la contaminación del suelo agrícola en el distrito de Chinchero, Cusco, Perú. [HTML]

Lazcano, C., y Domínguez, J. (2011). *The use of vermicompost in sustainable agriculture*. En: **Vermiculture Technology**, CRC Press.

Marcano, A. I. P., Acevedo-Duque, Á, y Mora, B. S. R. (2021). La sustentabilidad como principio de responsabilidad empresarial frente los ecosistemas naturales. *Revista de Filosofía*. academia.edu

Martínez, L. P. A., Islas-García, A., Luna, I. M., Cisneros, A. G. V., y Corona, R. E. L. (2025). Lombricomposta: Una experiencia educativa para transformar residuos en conciencia ambiental. *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, 4(1). unam.mx

Meneses B, M. J. (2023). Agricultura regenerativa sustentable para promover la diversidad en el suelo. utb.edu.ec

Merino P, C. J. (2024). Caracterización físico química de humus de heces de alpaca (*Vicugna pacos*) de diferentes cantones de la provincia de Chimborazo. esPOCH.edu.ec

Monroy, A. I. G., y Esquivel, I. A. G. (2021). Sistema de automatización para una lombricomposta. *Revista Electrónica sobre Tecnología, Educación y Sociedad*, 8(15). ctes.org.mx

Mora Lombeida, S. J. (2024). Prácticas intensivas y su efecto sobre la erosión del suelo. utb.edu.ec

Oleksyn, J., y Reich, P. B. (1994). Contaminación, destrucción del hábitat y biodiversidad en Polonia. *Conservation Biology*.

- Palacios G, F. A. (2025). Importancia de los abonos orgánicos en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus*, L.) en el Ecuador. utb.edu.ec
- Pico G, M. V. (2022). Evaluación de la composición físico-químico de los abonos orgánicos (humus y compost) producidos en la estación experimental Tunshi.. epoch.edu.ec
- Rodríguez-Delgado, I., Martín-Martín, G. J., Pérez-Iglesias, H. I., & García-Batista, R. M. (2025). Comportamiento de propiedades físicas, químicas y biológica del suelo en sistemas de producción agrícola. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 8(S1), 184-196. umet.edu.ec
- Rynk, R. (1992). *On-Farm Composting Handbook*. NRAES-54, Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service.
- Sánchez T, R. D. (2022). Estudio de enmiendas aplicadas al agua de riego, para ser utilizada en café robusta *Coffea canephora*, en la etapa de vivero en Manglaralto, Santa Elena.. upse.edu.ec
- Somarriba Reyes, R., & Guzmán González, G. (2004). *Análisis de la influencia de la cachaza de caña y estiercol bovino como sustrato de la lombriz roja californiana para producción de humus* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria, UNA).
- Tarda, A. S. (2023). Estudio de la degradación de *Typha latifolia* L. en bañados de desborde fluvial. unlp.edu.ar
- Ungucha, X. R. T., Naranjo, C. S. C., & Velásquez-Cajas, Á. P. (2024). Huertos climáticamente inteligentes: soberanía alimentaria y medicina ancestral en la comuna Yamanunka de Shushufindi, Ecuador. *Ciencias y Saberes* ISSN: 2960-8430, 2(3), 1-17. jordansrowles.co.uk
- Urgilez, M. D. R. (2024). Seguridad alimentaria: Riesgo asociados Metales Pesados sobre la salud humana. *Journal of American Health*. jah-journal.com
- Villalobos, J. R. V., y González, J. A. (2013). Las lombrices de tierra en la medicina popular española: un contraste en el uso medicinal a través de la Historia. *Medicina naturista*.

CAPÍTULO 8

EL SISTEMA PRODUCTIVO ALGODÓN (*GOSSYPIMUM HIRSUTUM* L.) EN LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO

Data de submissão: 11/06/2025

Data de aceite: 27/06/2025

Ignacio Orona Castillo

Universidad Juárez del
Estado de Durango

Facultad de Agricultura y Zootecnia
Venecia, Durango. México

<https://orcid.org/0000-0003-0486-0932>

Cirilo Vázquez Vázquez

Universidad Juárez del
Estado de Durango

Facultad de Agricultura y Zootecnia
Venecia, Durango. México

<https://orcid.org/0000-0002-8545-8381>

Apolinar González Mancilla

Universidad Juárez del
Estado de Durango

Facultad de Agricultura y Zootecnia
Venecia, Durango. México

<https://orcid.org/0000-0002-1066-1916>

Joaquín Osornio Córdova

Universidad Juárez del
Estado de Durango

Facultad de Agricultura y Zootecnia
Venecia, Durango. México

sin embargo, en los últimos años -2005 al 2021- la superficie sembrada disminuyó 37.3 % y la producción se ha concentrado en cinco municipios de los que San Pedro de las Colonias y Francisco I. Madero concentran el 82 %; ante esta situación este estudio tiene como objetivo caracterizar el sistema de producción algodonnero para ver la tendencia que seguirá en la región, teniendo como hipótesis que productores con mayores superficies (recurriendo a la renta y compra de tierras y derechos de agua para ello) obtienen mayores rendimientos y presentan menor incidencia de plagas y enfermedades. Para hacer el estudio se utilizó el muestreo aleatorio simple con un nivel de confianza del 95 % para determinar el número de productores a los que se aplicó una encuesta que comprendió aspectos técnicos y organizativos del manejo del algodón, aplicada de julio de 2021 a febrero de 2022 en los municipios de San Pedro de las Colonias y Francisco I. Madero Coahuila. Los resultados muestran que los productores con mayores superficies son más jóvenes y obtienen los mayores rendimientos y menor incidencia de plagas, y que a mayor superficie la renta de tierras y agua aumenta, concluyéndose que la tendencia del cultivo en la Comarca Lagunera es sembrarse con tierras y derechos de agua rentados, observándose que ha dejado de ser un cultivo de minifundio y están surgiendo plantaciones de algodón que rebasan las 150 ha.

PALABRAS CLAVE: tecnología de producción; plagas y enfermedades; renta de tierra y agua.

RESUMEN: La Comarca Lagunera se ha caracterizado por ser una zona algodonnera;

THE COTTON PRODUCTION SYSTEM (*GOSSYPIMUM HIRSUTUM* L.) IN THE COMARCA LAGUNERA REGION, MEXICO

ABSTRACT: The Lagunera Region has been characterized as a cotton area; however, in recent years (2005 to 2021) the planted area decreased by 37.3 % and production has been concentrated in five municipalities, of which San Pedro de las Colonias and Francisco I. Madero concentrate 82 %; faced with this situation, this study aims to characterize the cotton production system to see the trend that will continue in the region, taking as a hypothesis that producers with larger areas (using rent and purchase of land and water rights for it) obtain greater yields and have a lower incidence of pests and diseases. To carry out the study, simple random sampling was used with a confidence level of 95 % to determine the number of producers to whom a survey was applied that included technical and organizational aspects of cotton management, applied from July 2021 to February 2022 in the municipalities of San Pedro de las Colonias and Francisco I. Madero Coahuila. The results show that the producers with larger areas are younger and obtain the highest yields and lower incidence of pests, and that the larger the area, the rent of land and water increases, concluding that the tendency of cultivation in the Comarca Lagunera is to plant with land and rented water rights, noting that it has increased to be a smallholding crop and cotton plantations that exceed 150 ha are emerging.

KEYWORDS: production technology; pests and diseases; land and water rent.

1. INTRODUCCIÓN

En el ciclo agrícola 2022 se cosecharon en México 157,993 ha, siendo el estado de Chihuahua el que mayor superficie sembró, participando con 118,059 ha, seguido por Baja California Norte con 13,522; Coahuila con 11,391; Tamaulipas con 10,847 ha; Sonora con 2,635 ha, y Durango con 1,539 ha. En cuanto a su rendimiento en este ciclo, el mayor valor lo obtuvo Coahuila con 5.509 toneladas por hectárea de algodón en hueso, seguido por, Chihuahua y Durango con 5.471 y 5.208 ton/ha respectivamente (SIAP, 2023).

La Comarca Lagunera se ha caracterizado siempre por ser una zona algodонера; sin embargo, en los últimos años la superficie sembrada ha venido disminuyendo por diversas causas. Con base a los datos estadísticos reportados por el SAGDER (2022) la superficie sembrada y cosechada en esta región disminuyó 37.3 % mientras la producción lo hizo en 35.3 %, concentrándose el 82 % de la superficie sembrada en dos municipios, situación que motivó la realización de este estudio que tiene por objetivo caracterizar el sistema de producción algodonero y mediante una estratificación de productores identificar las diferencias en rendimientos y problemas fitosanitarios entre estos para determinar el nivel de producción obtenida por estratos de productores y problemas fitosanitarios que enfrentan en su cultivo, teniendo como hipótesis las siguientes: los productores con mayor superficie de algodón obtienen mayores rendimientos y presentan menor incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo, y que mayores

superficies sembrada con algodón son posibles por la existencia de renta de derechos de tierra y agua.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio queda comprendida en la región llamada Comarca Lagunera, ubicada en el centro-norte de México. El clima de esta zona, según la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (Cháirez y Palerm, 2013), corresponde a BWhw" (e'), que se caracteriza por ser muy seco o desértico, semi cálido con invierno fresco, con una temperatura media anual entre 18 y 22 °C, y del mes más frío menor a 18 °C, con una precipitación media de 250 mm y una evaporación potencial del orden de 2,500 mm anuales.

El estudio se concentró en despepitadoras enclavadas en los municipios de Francisco I. Madero y San Pedro de las Colonias, Coahuila, que concentraron ese año el 83 % de la superficie sembrada con algodón.

De un universo muestral de 580 productores de algodón, registrados en despepitadoras ubicadas en los municipios de Francisco I. Madero y San Pedro de las Colonias, Coahuila se determinó el tamaño muestra, aplicando para ello la siguiente fórmula estadística aportada por Stephen and William (1996), habiéndose estimado un tamaño de muestra de 80 productores.:

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2 N}{e^2 (N - 1) + Z^2 \sigma^2}$$

Establecido los valores adecuados, se procedió a realizar la sustitución de estos y se aplicó la fórmula para obtener el tamaño de la muestra poblacional, que fue de 80. Para realizar la caracterización de productores se dividió la muestra en tres estratos: el primero comprendió los que sembraron hasta cinco hectáreas, llamándoles pequeños productores; el segundo a los que sembraron entre 5.1 y 25 hectáreas, llamándoles medianos productores, y el tercer grupo a los productores que sembraron superficies mayores a 25 hectáreas, llamándoles grandes productores. De acuerdo con dicho criterio, 28 % de los productores de algodón quedan clasificados como pequeños; 32 % como medianos, y 20 % como grandes productores.

Los datos se obtuvieron de una encuesta integrada por 41 preguntas contestadas por los dueños de las unidades de producción algodonerías; dicha encuesta contuvo información sobre aspectos técnicos del cultivo y aspectos de organización y apoyo al productor. Esta etapa comprendió del mes de junio de 2022 hasta el mes de enero del

2023. Revisada la información de los cuestionarios se procedió a su captura, utilizando para ello el Programa Microsoft Excel, en donde fue procesada para su análisis. Mediante esta herramienta se calcularon para cada una de las unidades de producción los valores de las variables involucradas a nivel global y para cada uno de los estratos de productores definidos, habiéndose hecho el análisis comparativo correspondiente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. EDAD DEL PRODUCTOR Y NÚMERO DE AÑOS DEDICADOS AL CULTIVO

El promedio de edad identificado entre los dedicados a este cultivo ascendió a 56 años, con una edad mínima de 26 años y una máxima de 85. Para el caso de los pequeños, medianos y grandes productores el promedio de edad fue de 61,57 y 50 años respectivamente, advirtiéndose que los grandes productores son más jóvenes en general.

En un estudio realizado para la Comarca Lagunera por Ávila G., *et al.*, (2017) la edad promedio de los productores dedicados al algodón fue de 60.4 años y la mínima de 31; comparando aquellos y los resultados obtenidos se infiere que los productores de más edad se han ido retirando del cultivo, y que cada vez ingresan como productores de algodón personas más jóvenes, pues para el 2021 se reporta la edad más joven de 26 años.

3.2. NIVEL EDUCATIVO DE LOS PRODUCTORES DE ALGODÓN

El estudio encontró que la proporción de productores por nivel educativo prevaleciente a nivel general es la educación primaria. El sector con mayor proporción de productores que poseen mejor nivel de estudio está en los grandes productores.

Para el estudio de línea base realizado por FAO (2016) para Bolivia, se reporta que el 11 por ciento de los productores de algodón no saben leer ni escribir, mientras que en la zona de estudio que nos ocupa este valor ascendió al tres por ciento.

A nivel de la Comarca Lagunera destaca el hecho de que cuatro de cada diez productores cuentan con un nivel de estudios superior al de la educación preparatoria, donde la mayor proporción son egresados del área de agronomía.

3.3. FINANCIAMIENTO A LA PRODUCCIÓN ALGODONERA

La proporción de productores de algodón que no recibieron financiamiento para el cultivo en el ciclo 2021 fue del 14, 19 y 25 por ciento para los pequeños, medianos y grandes. El resto utiliza recursos propios o a través de la despepitadora a la que están agremiados, advirtiéndose que a mayor tamaño de superficie prescinden más de este

apoyo. El financiamiento recibido a través de la despepitadora ésta lo administra y como es aquí donde los productores despepitan el algodón, lo empaacan y lo almacenan para su venta, una vez que lo venden se hace la liquidación al productor.

Relativo al tema financiamiento a productores de algodón, para 2020 en la República Argentina, según el diario Argentino en línea INFOBAE (2020) reportó que el 50 por ciento del área sembrada con el cultivo requerían del mismo para finalizar su cosecha, lo que indica que existe mejor apoyo en este rubro para los productores de la Comarca Lagunera que para aquellos productores.

3.4. PÉRDIDAS DE ALGODÓN EN LA COSECHA

De acuerdo a la información proporcionada por los productores encuestados, el 98 por ciento de ellos cosecha su algodón de manera mecánica, pero a nivel general la pérdida de algodón en hueso al momento de la cosecha asciende al 7 por ciento del total, que equivaldría a 400 kilos del rendimiento promedio global reportado, que es de 5726 kilogramos. Los porcentajes de cosecha mínimo y máximo reportados como pérdida oscilan entre 2 y 30 por ciento.

La razón de no pepenar el algodón es porque se paga más por cosecharlo manualmente que lo que van a recuperar en términos monetarios. Además, como no hay diferencia en el precio que reciben por el algodón cosechado mecánica y manualmente, no se incentiva la cosecha manual. Por lo anterior se acabó el dicho de que “el cultivo del algodón es de importancia social por generar muchos empleos en la cosecha del mismo.” La Revista Argentina Amanecer Rural (2018) reporta pérdidas por cosecha mecánica de algodón excesivamente maduro de entre 215 a 321 kg/ha, menor al reportado en este estudio.

3.5. TENDENCIA DE LA SUPERFICIE SEMBRADA CON ALGODÓN EN LA COMARCA LAGUNERA

La superficie destinada al cultivo del algodón, ha venido disminuyendo a causa de la inestabilidad del precio en el mercado internacional, a los altos costos de producción que enfrenta y al problema de la alta incidencia de plagas; lo que ha ocasionado una mayor oferta de tierras y derechos de agua en renta o venta suficientes para que productores con más condiciones económicas adquieran dichos recursos para sembrar superficies más grandes del cultivo y ello lo haga atractivo y rentable, de tal manera que lo que este estudio identificó es que del total de superficie sembrada con algodón, un 70 % de la superficie se hace en terrenos y derechos de agua rentados.

Por estratos de productores pequeños, medianos y grandes la proporción de superficies sembradas con derechos rentados fueron del, 47.7, 77 y 69.2 % de la superficie sembrada. Puede afirmarse entonces, la tendencia del cultivo a ser producido cada vez más en tierras y derechos de agua rentados y/o comprados.

3.6. PLAGAS Y AGROQUÍMICOS UTILIZADOS EN EL CULTIVO DE ALGODÓN

Aun cuando se utilizan semillas transgénicas que hacen posible una menor presencia de plagas, las mayormente registradas fueron: Picudo (*Anthonomus grandis*), Conchuela (*Chlorochroa ligata*) y Mosca blanca (*Bemisia tabaci*) reportadas en el 69, 49 y 25 % de los predios, respectivamente.

La presencia de Picudo y Conchuela es mayor en los predios pequeños; mosquita blanca predomina en los grandes, y Gusano soldado y Pulgón solo en los medianos productores. De acuerdo a SAGARPA (2012), el Picudo del algodonnero es la plaga de mayor importancia que afecta la producción de algodón debido a su capacidad de dispersarse, pues se transporta fácilmente dentro de los frutos como huevo, larva, pupa o adulto.

3.7. ENFERMEDADES Y SU CONTROL

La presencia de enfermedades reportadas se concentra en problemas de Pudrición texana (*Phymatotrochopsis omnivora*), causada por el hongo *Phymatotrichum omnivorum*.

Otra enfermedad reportada es el Verticillium, causada por el hongo *Verticillium dahliae* y favorecida por alta humedad y temperaturas relativamente bajas (20 a 25 grados centígrados) en el suelo, reportada por el 4 % de los productores, para cuyo control utilizan el Pointer a razón de 1.5 l/ha.

La viruela causada por el hongo *Puccinia cacabata* se presenta en el uno por ciento de los productores encuestados. Estas enfermedades se presentan también para el Estado de Chihuahua, donde además se reporta la Secadera temprana, causada por *Rhizoctonia solani*, (Panorama Agropecuario, 2021).

3.8. RENDIMIENTO Y FORMA DE COSECHAR EL ALGODÓN EN HUESO

El rendimiento promedio de algodón en hueso reportado fue de 5.726 toneladas por hectárea; sin embargo, los valores máximo y mínimo registrados fueron de 7.5 y 3 toneladas, respectivamente.

A nivel de pequeños, medianos y grandes productores, los rendimientos encontrados por este estudio en la Comarca Lagunera fueron de 5275, 5923 y 6042 kg por hectárea, respectivamente, lo que significa que a mayor superficie destinada al cultivo mejor manejo tecnológico del cultivo existe, confirmándose así la hipótesis planteada por este trabajo. La forma predominante de cosechar es mecánica por el 63 % de los productores; mecánica y manual, por el 35 % (sólo manual en bordos y cabeceras de las parcelas), y de forma completamente manual con mano de obra familiar, el dos por ciento.

3.9. FACTORES QUE LIMITAN LA SIEMBRA DE ALGODÓN

Al preguntar sobre los factores que limitan la siembra del algodón, éstos fueron diversos y numerosos, prevaleciendo los altos costos de producción y falta de financiamiento a insumos; la falta de tierras con derechos de agua, ausencia de apoyos que incentiven la producción de algodón, y la incertidumbre en los precios internacionales del algodón.

Sin embargo, al preguntarles sobre si estarían dispuestos a seguir cultivando algodón, sólo el nueve por ciento afirmó que no, debido a que no dispone de suficientes tierras y agua para ello; otra respuesta fue por ser un cultivo altamente riesgoso en los precios de mercado, además de ser un cultivo con altos costos de producción que no puede sufragar.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos e hipótesis planteadas por este estudio, las principales conclusiones y recomendaciones derivadas, se presentan a continuación:

Existe la tendencia a que los productores de algodón clasificados como pequeños sean los de mayor edad y los productores con superficies más grandes los más jóvenes, lo que indica una transición generacional del cultivo del algodón en la Comarca Lagunera. Esta situación, sumada a la mayor preparación académica que se presenta en el estrato de los grandes productores propicia una mayor capacidad de competencia productiva, lo que impactaría positivamente al sistema productivo.

Respecto a los rendimientos obtenidos por hectárea por estrato de productor, se encontró que a mayor superficie sembrada mayor es el rendimiento alcanzado y menores los problemas fitosanitarios enfrentados, lo que confirma las hipótesis planteadas. Las razones de ello serían el mayor cuidado y oportunidad que se da al manejo del cultivo.

La tendencia del cultivo de algodón en la Comarca Lagunera es a ser sembrado con tierras y derechos de agua rentados, pues sembrarlo en pequeñas superficies resulta

difícil por los altos costos de producción que registra; observándose que ha dejado de ser un cultivo de minifundio y están surgiendo plantaciones de algodón que rebasan las 150 ha. Este hallazgo confirma la hipótesis inicial planteada por este estudio.

La situación que presenta el sistema de producción es su alta dependencia del precio internacional. Esta dependencia debe solventarse mediante la participación gubernamental como apoyos en coberturas de precio al productor, mayores facilidades crediticias, servicios de almacenes de depósito para el reguardo de la fibra, y un pago inmediato para tener liquidez para pagar créditos y mantener su capacidad de operación; es urgente la generación de políticas públicas que se ocupen de cumplir estas necesidades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amanecer Rural (2018). http://amanecerrural.com.ar/es/nota_tecnica/03286-evaluacion-de-perdidas-por-cosecha-mecanica-en-algodon

Ávila G. R., Cano R. P., Orona C. I., Espinoza A. J.J. y Ramírez, S. R. 2017. Establecimiento de la línea base para la evaluación del impacto técnico y socioeconómico de la campaña contra plagas reglamentadas del cultivo del algodón (Gossypium hirsutum) en el estado de Coahuila, México. Revista Mexicana de Agronegocios. Vol 4, pp. 720-731

Cháirez, A. C. y Palerm, V. J. 2013. Organizaciones autogestivas en los distritos de riego: el caso del módulo III San Jacinto en el Distrito de Riego 017, Durango, México. En: Tecnología y Ciencias del Agua, vol IV, núm 4., septiembre-octubre, 2013, pp. 19-46.

FAO, 2016. Fuente: Estudio de caracterización de sistemas productivos e indicadores de sostenibilidad. Bolivia. FAO 2016.

INFOBAE, 2020. <https://www.infobae.com/campo/2020/05/01/productores-de-algodon-buscan-financiamiento-para-finalizar-la-cosecha/>

Panorama agropecuario, 2021. https://panorama-agro.com/?page_id=1639#:~:text=Entre%20las%20enfermedades%20m%C3%A1s%20importantes%20en%20esta%20regi%C3%B3n,verticillium%2C%20podrici%C3%B3n%20texana%20y%20la%20viruela%20del%20algodonero

SAGARPA (2012). <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/algodon-hueso-produccion-y-lucha-contra-el-picudo-y-gusano-del-algodonero?idiom=es#:~:text=1%20Picudo%20del%20algodonero%3A%20es%20la%20plaga%20de,al%20alimentarse%20de%20los%20estambres%20y%20el%20polen>

SAGDER (2022). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) - Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON).

SIAP, 2023. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadísticas de la producción agropecuaria y su valor. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/identidad/index.jsp

Stephen, I. and William, B. M. 1996. Handbook in Research and Evaluation. A collection of principles, methods, and strategies useful in planning, design and evaluation studies in educational and behavioral sciences. Second edition. Edits Publishers. San Diego California. USA.

CAPÍTULO 9

PRECIO DE MERCADO Y COSTOS DE CONSERVACIÓN DE SEMILLAS DE *Cedrela Odorata* L. DE POBLACIONES VULNERABLES AL CAMBIO CLIMÁTICO, MÉXICO

Data de submissão: 05/06/2025

Data de aceite: 27/06/2025

Salvador Sampayo-Maldonado

Universidad Nacional
Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Iztacala
(UNAM-FESI)
Unidad de Biología Tecnología y
Prototipos (UBIPRO)
Edo de Méx, Mexico
<https://orcid.org/0000-0002-0221-8930>

***Joel Rodríguez-Zúñiga**

Instituto Tecnológico Superior de
Tantoyuca (ITSTA)
Departamento de Posgrado e
Investigación Tantoyuca, Veracruz, México
<https://orcid.org/0000-0002-4038-8666>

Horacio Bautista-Santos

Instituto Tecnológico Superior de
Tantoyuca (ITSTA)
Departamento de Posgrado e
Investigación Tantoyuca, Veracruz, México
<https://orcid.org/0000-0002-3925-2438>

Fabiola Sánchez Galván

Instituto Tecnológico Superior de
Tantoyuca (ITSTA)
Departamento de Posgrado e
Investigación Tantoyuca, Veracruz, México
<https://orcid.org/0000-0002-6534-3210>

Juan Sebastian Rodríguez Bravo

Colegio de Postgraduados (COLPOS)
Posgrado en Estadística Aplicada
Texcoco, Méx, México
<https://orcid.org/0000-0001-8525-9510>

Oscar Del Ángel Piña

Instituto Tecnológico Superior de
Tantoyuca (ITSTA)
Departamento de Posgrado e
Investigación Tantoyuca, Veracruz, México
<https://orcid.org/0009-0007-0817-2383>

RESUMEN: El objetivo fue evaluar la distribución potencial de *Cedrela odorata* L. ante escenarios de Cambio Climático (CC) y analizar los costos para conservar semillas de poblaciones vulnerables (PV) y su precio de mercado futuro en un Banco de Semillas (BS). Se modeló la distribución potencial de *Cedrela odorata*. de acuerdo al modelo GISS-E2-1-G (del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS) de la NASA), de la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del Panel Intergubernamental (IPCC) sobre CC. Mediante el método de costo de recolección, se estimaron los costos de colecta y almacenamiento de semillas de la especie antes señalada en un BS de PV al CC. De acuerdo con los escenarios de CC para el año 2050 se prevé que, la distribución de las poblaciones disminuirán entre 17% y 21% de su distribución actual. El valor de una accesión

* Autor de correspondencia, Tecnológico Nacional de México

en el tiempo uno de almacenamiento, es 14.5 veces más que su precio en el mercado. Con una tasa de interés nominal de 8.24% para el año 2050, el costo de una accesión será nueve veces más a su valor presente o 130 veces más que su precio de mercado actual. Asimismo en el mercado de las semillas y con una tasa de inflación proyectada para el año 2050 el precio sería del 3.4 veces a su precio actual; sin embargo este valor es poco probable ya que la escasez incrementará la demanda y por lo tanto a su precio. Este trabajo es importante para la conservación del germoplasma de PV en un BS y representan una inversión estratégica debido al valor económico e importancia ambiental de la especie.

PALABRAS CLAVE: accesión; almacenamiento; cambio climático; costos; distribución.

MARKET PRICE AND CONSERVATION COSTS OF *Cedrela Odorata* L. SEEDS FROM POPULATIONS VULNERABLE TO CLIMATE CHANGE, MEXICO

ABSTRACT: The aim was to evaluate the potential distribution of *Cedrela odorata* L. under Climate Change (CC) scenarios and to analyze the costs of conserving seeds from vulnerable populations (VP) and their future market price in a Seed Bank (SB). The potential distribution of *Cedrela odorata* was modeled according to the GISS-E2-1-G model (from NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS)), part of Phase 6 of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Coupled Model Intercomparison Project. Using the collection cost method, the costs of collecting and storing seeds of the aforementioned species were estimated in a BS from PV to CC. According to CC scenarios, by 2050, population distribution will decline by 17% to 21% from its current distribution. The value of an accession at storage time one is 14.5 times its market price. With a nominal interest rate of 8.24% in 2050, the cost of an accession will be nine times its present value, or 130 times its current market price. Likewise, in the seed market, with a projected inflation rate for 2050, the price would be 3.4 times its current price; however, this value is unlikely since scarcity will increase demand and therefore its price. This work is important for the conservation of PV germplasm in a BS and represents a strategic investment due to the economic value and environmental importance of the species.

KEYWORDS: accession; climate change; costs; distribution; storage.

1. INTRODUCCIÓN

Cedrela odorata L. es un árbol de la familia Meliaceae nativo de América, se distribuye desde el norte de México hasta la Argentina, se puede encontrar hasta los 1200 msnm y se desarrolla en los trópicos húmedos y subhúmedos (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023). En México se distribuye a lo largo del Golfo, desde el sur de Tamaulipas y el sureste de San Luis Potosí hasta la Península de Yucatán, y en el Oeste del país, desde el sur de Sonora hasta el sur de Guerrero, en la Depresión Central y la costa de Chiapas (Hernández-Ramos *et al.* 2018). Es una especie muy valiosa con alta demanda en el mercado internacional y de gran importancia en la industria forestal mexicana; con extracción intensiva de su madera y el cambio del uso del suelo ha disminuido sus

poblaciones y áreas de distribución (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023); y es amenazada sujeta a protección especial bajo la Norma Oficial Mexicana 059 (NOM-059) (PEF 2010). Como una estrategia para su conservación, se recomienda la colecta y almacenamiento de semillas de poblaciones potencialmente vulnerables al CC (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a, Sampayo-Maldonado *et al.* 2023).

Se pronostica que la escasez de la especie afectará a la industria de la madera y celulosa, a la empresa forestal comunitaria (EFC), y a la sociedad en general (Sáenz-Romero 2004). De acuerdo a Parmesan (2006), la escasez responde a una situación en la que la demanda futura supera la oferta prevista, por lo que depende, entre otras cosas, de la tasa de consumo actual y futuro (oferta-demanda) este rol afectará en la variación de los precios de mercado de los recursos naturales.

Los BS permiten una prolongada preservación de semillas en espacios pequeños y con riesgo mínimo de daño genético, por lo que se convierten en sitios estratégicos que requieren una inversión a mediano y largo plazo (De-Zhu Li y Hug 2009). Los modelos de valoración económica en germoplasma mencionan que el costo anual de operación de un BS es considerablemente menor que las ganancias que podrían obtenerse por el uso de genotipos de mayor rendimiento o con características superiores (Mora *et al.* 1999). Además de ser fuente de recursos genéticos útiles en ambientes futuros (Romo-Lozano *et al.* 2017).

El método adecuado para el análisis de costos por coleccionar semillas de especies forestales ante escenarios adversos es el Costo de Recolección (Ibarrarán *et al.* 2003, Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022b). Debido a la importancia de *C. odorata* en el mercado de las maderas preciosas e importancia ambiental, es importante medir la actividad económica por los costos de coleccionar semillas y su valor futuro por su almacenamiento aplicando una tasa de inversión por escasez del recurso (Brambila 2006, De-Zhu Li y Hug 2009). Estudios realizados sobre el análisis de costos de colecta y almacenamiento de germoplasma *ex situ* de especies forestales ante escenarios adversos por CC son los de Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022a) en especies del género *Pinus* y de Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022b) en árboles nativos de México. En ambos casos se pudo estimar, a través de diversas tasas de interés nominal por escasez, el valor presente y de un periodo de planeación de 28 años (año 2050) de muestras de semillas en un BS.

La conservación de semillas en un BS implica un costo social que debería sopesarse en relación con el valor que representa para la sociedad en general. En ese sentido se debe establecer un marco legal satisfactorio soportado por investigaciones para construir políticas públicas congruentes en la conservación del germoplasma de esta

y otras especies con importancia social, económica y ambiental. Los BS en las próximas décadas se posicionarán como espacios estratégicos para conservar el patrimonio florístico de México (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022(a)). Bajos los argumentos antes señalados, este estudio tuvo como objetivo evaluar la distribución potencial de *C. odorata* en México ante escenarios adversos por CC y analizar los costos de la conservación y variaciones en el precio de mercado de muestras de semillas de poblaciones vulnerables en un BS ante dicho escenario

2. METODOS

El trabajo de investigación comprendió dos etapas:

(1) Distribución potencial e identificación de zonas de colecta de semillas bajo escenarios de CC. Los modelos de distribución de *C. odorata* se construyeron en MaxEnt con los datos de presencia de la especie, disponibles en bases de datos georreferenciadas para el país y se utilizaron las variables climáticas de BioClim (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023).

Adquisición de datos: Se construyó una base de datos de especímenes georreferenciados recolectados en el país, utilizando información contenida en la plataforma Global Biodiversity Information Facility (GBIF), de especímenes depositados en herbarios alrededor del mundo (<https://www.gbif.org/> (consultado el 2 de mayo de 2022)). Se depuró la base de datos para eliminar aquellos que eran incompletos o referencias ubicadas en zonas urbanas o agrícolas.

Variables climáticas: Se utilizaron 19 variables climáticas con una resolución espacial de 0,3 minutos de arco obtenidas de la base de datos BioClim 2019 (<http://www.worldclim.org/> (consultado el 9 de mayo de 2022), para el periodo de 1970 a 2000 para la actual distribución, a una resolución de 1 km² por píxel (Hijmans *et al.* 2005). Las capas en formato vectorial de uso de suelo y vegetación fueron tomadas de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad de México (CONABIO) (2015).

Distribución actual: Para obtener el área del hábitat climático óptimo bajo la distribución actual, se utilizó la versión 2.1 de BioClim con datos del periodo de 1970 a 2000. Los modelos de distribución de la especie (SDM) se construyeron con MaxEnt (versión de software 3.4.1[®]) (Phillips *et al.* 2017). Este proceso también se conoce como modelado de nicho ecológico debido a que se incluyeron solo variables climáticas (Phillips *et al.* 2017). Se implementó el método jackknife en MaxEnt, el cual indica la contribución relativa de cada variable climática al modelo. El programa se corrió nuevamente usando las variables climáticas que más contribuyeron al modelo para generar mapas. La distribución espacial

del hábitat climático óptimo se obtuvo de la herramienta ArcMap 9.3®, obteniendo el número de píxeles y transformando a km². Finalmente, generamos mapas de distribución de la especie en el clima contemporáneo con una probabilidad mayor al 50%.

Distribución futura: Para obtener el área con hábitat climático óptimo se utilizó la versión 1.4 de BioClim. Los SDM se construyeron con MaxEnt (versión de software 3.4.1®) (Phillips *et al* 2017). Se descargaron las capas climáticas del Modelo de Circulación General (GCM) del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), de los Estados Unidos de América (GISS-E2-1-G). Estos se generaron usando los Modelos Regionales de la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), proyectado para un horizonte futuro intermedio: año 2050 (con un promedio de 2041-2060); y un horizonte futuro lejano: año 2090 (con un promedio de 2081-2100). Con Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP1) de 2.6 y (SSP5) de 8.5 Watts/m² (emisiones de CO₂ moderadas y extremas) (Fernández-Eguiarte *et al.* 2015), se implementó el método jackknife en MaxEnt, el cual indicó la contribución relativa de cada variable climática al modelo. Se volvió a ejecutar el programa para generar mapas utilizando las variables climáticas que más contribuyeron al modelo. La distribución espacial del hábitat climático óptimo se obtuvo mediante la herramienta ArcMap 9.3® (obteniendo el número de píxeles y transformando a km²). Finalmente, generamos mapas de distribución de las especies bajo los escenarios climáticos futuros, con una probabilidad de distribución mayor al 50%.

Validación de modelos de distribución: Para la validación de modelos se siguieron las recomendaciones de Peterson y Soberón (2008). La prueba se llevó a cabo utilizando el 30% de los datos, que se eligieron al azar de todos los lugares donde la especie estaba presente. La bondad de ajuste de las predicciones del modelo se evaluó utilizando el área bajo la curva (AUC) de las características operativas del receptor (ROC). Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para probar la multicolinealidad entre las 21 variables ambientales (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023).

(2) Costos de colecta y de almacenamiento de semillas para el periodo 2018 al 2050. La unidad básica de evaluación fue de una accesión de semillas de tres poblaciones de *C. odorata*, que serán afectadas negativamente por el CC. Una accesión es una muestra de 3000 a 4000 semillas diferenciables e identificables de forma única, que representan un cultivar, una línea mejorada o una población, que se mantiene almacenada para su uso y conservación (Kameswara *et al.* 2007). Mientras que la forma de colecta, tratamiento y almacenamiento de las muestras fue de acuerdo al manual establecido por kamesawara *et al.* (2007).

Para el análisis de costos de colecta y almacenamiento de las accesiones, se utilizó el escenario de un BS en una Institución con infraestructura para fines de investigación y conservación en el centro de la República Mexicana. Se actualizó a valor actual la memoria de costos de colecta, de tratamiento y de almacenamiento de semillas de especies de pino en un BS, reportadas en el trabajo de Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022a) y su recomendación para investigaciones futuras de especies forestales comerciales y en estatus de protección *ex situ*.

Se obtuvo información de cotización y precios de semillas colectadas de algunas especies forestales por prestadores de servicios técnicos forestales (PSTF), y de funcionarios públicos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Asimismo, se entrevistó a diversos investigadores de un BS con fines de investigación y conservación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), sobre la operatividad y de las formas de colecta de semillas en campo.

El proceso de evaluación económica consistió en: (a) cálculo de los costos totales (CT) (costos fijos (CF) más costos variables (CV)) de colecta, tratamiento, almacenamiento y mantenimiento de una muestra (accesión): al desconocer los CF (infraestructura y operación de una organización, en este caso un BS), se recurrió al criterio propuesto Pradhan (2011) y Brambila (2006) quienes sugieren que los (CT) es casi igual a dos veces el CV (Ec 1. Cuadro 1); b) cálculo de la tasa de movimiento del valor de la producción forestal de *C. odorata* para el año 2050 ante escenario de CC o tasa de escases (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a) (Ec. 2., Cuadro 1), para ello se utilizó la serie de tiempo de los años 1993-2018, de una tercera parte del valor total de la producción foresta de maderas preciosas (CONAFOR-SEMARNAT 2019), la cual corresponde a la producción de *C. odorata* L. (Romo-Lozano *et al.* 2017). Esto representó la línea base para proyectar un modelo del valor de la producción para el año 2050 bajo un escenario de escasez por la reducción de las áreas de dichas especies); c) Valor de la semilla almacenada para el año 2050, la cual se calculó de acuerdo a la ecuación propuesta por Brambila (2006) y metodología por Rodríguez-Zuñiga *et al.* (2022a) (Ec. 3, Cuadro 1). Esto es, usar una tasa nominal para obtener el valor futuro: 7% para cualquier proyecto de inversión recomendado por BANXICO (2022) más aquella tasa obtenida por escasez de recurso (r) (Brambila 2006, De-Zhu y Hug 2009, Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022a); y d) estimación del precio de mercado de la semilla de *C. odorata* para el año 2050, considerando el precio actual y el historial de los últimos 25 años de la tasa de inflación y su proyección para el año 2050 (Brambila 2006) (Ec. 4, Cuadro 1).

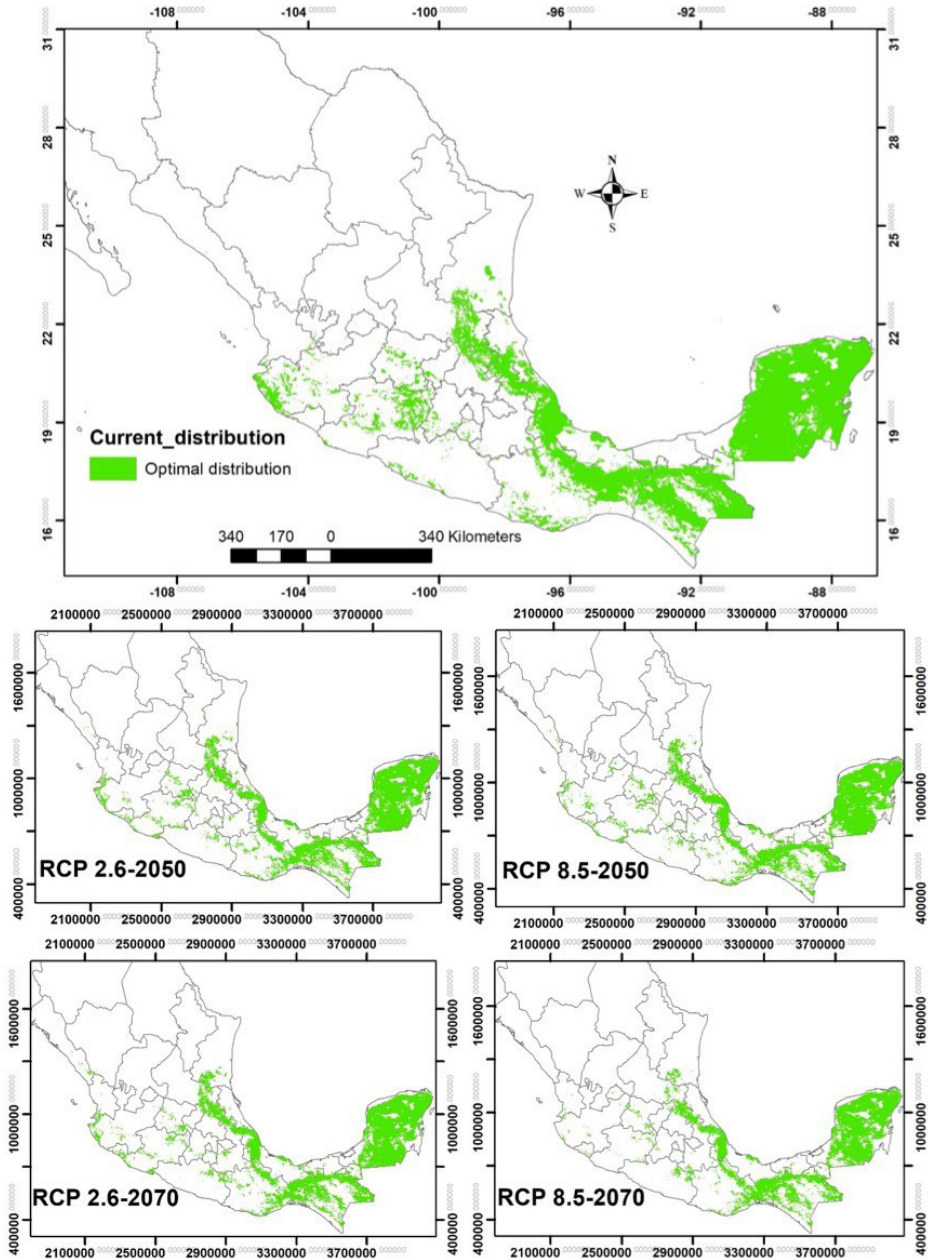
Cuadro 1. Resumen de ecuaciones utilizadas en el estudio.

Nombre	Desarrollo de ecuación	
Costos totales de colecta y almacenamiento (CTCA)	$CTCA = 2(CV)$ Donde: CV = costos variables	[1]
Tasa de movimiento (r) de <i>C. odorata</i> ante escenario de CC.	$\left(\frac{VP2050}{VPA}\right)^{\frac{1}{t}} - 1 = r$ Donde: VP2050 = Valor proyectado de la producción forestal de <i>C. odorata</i> para el año 2050; VPA = valor actual de la producción forestal del <i>C. odorata</i> L; t = tiempo en años para el 2050 (28 años); y r = tasa de movimiento.	[2]
Valor de la semilla almacenada para el año 2050 (VSA2050)	$VSA2050 = (CTCA) * (1+i)^t$ Donde: VSA2050 = valor de la semilla almacenada para el año 2050; i = tasa de rendimiento por almacenamiento de una accesión ante escenarios de escasez del recurso (7% más r); t = periodo de planeación por almacenamiento de semillas (28 años).	[3]
Precio de mercado de la semilla para el año 2050 (PM2050)	$PM2050 = (PAM) * (1+p)^t$ Donde: PM2050= precio de mercado de la semilla de <i>C. odorata</i> para el año 2050; PAM= precio actual de mercado de <i>C. odorata</i> ; p= tasa de inflación proyectada para el año 2050; t = periodo de planeación (28 años).	[4]

3. RESULTADOS

Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático. Los modelos de la distribución tuvieron valores bajo la curva (AUC) de 0.914 ± 0.013 ; Lo que indica un buen ajuste, con una probabilidad mayor al 50% de encontrar a la especie. De acuerdo con los escenarios de cambio climático del modelo GISS-E2-1-G, la distribución de las poblaciones de *C. odorata*, en el futuro van a disminuir entre 17 y 36% de su distribución actual (Figura 1). Según el método jackknife implementado en MaxEnt, las variables que más contribuyeron para la construcción del modelo de la distribución actual fueron: precipitación anual (33.4%), rango de temperatura anual (17.3%), precipitación del mes más seco (10%), precipitación del trimestre más húmedo (8.4%), tipo de suelo (7.4%) y la altitud (3.8%).

Figura 1. Distribución actual y proyectada para 2050 y 2090 de *C. odorata*, bajo escenarios de concentración SSP1-2.6 y SSP5-8.5 en el modelo GISS-E2-1-G.)



En el futuro cercano (2050), Con Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) de 2.6 y 8.5 Watts/m², se espera una reducción de las áreas de 17.02 y 21.88% respectivamente, con condiciones óptimas para la distribución de la especie; en

comparación con la distribución actual (Cuadro 2). En el escenario de menores emisiones de CO₂ (SSP1-2.6), se pronostica la disminución de poco más de un cuarto de la distribución actual. Se espera que en Zacatecas pierda condiciones adecuadas para la distribución de la especie. Mientras que en Aguascalientes se reducirá en un 90% la distribución de la especie. Las variables climáticas que más contribuyeron al modelo fueron: precipitación del trimestre más húmedo (39.6%), temperatura mínima del mes más frío (9.4%), estacionalidad de la temperatura (8.9%), el tipo de suelo (8.5%), precipitación del mes más seco (6.9%) y la altitud (5.1%). Para el escenario de mayores emisiones de CO₂ (SSP5-8.5), la distribución de la especie disminuye un 4.8% más que el escenario (SSP1-2.6). Para este escenario al igual que el anterior Zacatecas pierde condiciones óptimas para *C. odorata*. Mientras que Michoacana y Veracruz pierden el 50 y 30% de distribución de la especie, respectivamente. Esto es con respecto a la distribución actual. Las variables que más contribuyeron al modelo fueron: precipitación del trimestre más húmedo (44.1%), temperatura mínima del mes más frío (12.4%), el tipo de suelo (9.4%), precipitación del mes más seco (8.2%), estacionalidad de la temperatura (6.6%) y la temperatura del trimestre más frío (5.2%)

Cuadro 2. Área actual y pronosticada (km²) por estado, para las poblaciones de *C. odorata* de acuerdo a los escenarios de cambio climático según el modelo GISS-E2-1-G.

State	Current (km ²)	Año 2050 (km ²)		Año 2090 (km ²)	
		SSP1 2.6	SSP5 8.5	SSP1 2.6	SSP5 8.5
Aguascalientes	5.38	0.54	341.79	2.67	74.88
Campeche	43648.58	39207.33	40340.71	38718.46	34125.32
Chiapas	43170.28	33731.74	30720.98	32008.64	28996.30
Colima	128.97	798.73	707.37	921.23	284.79
Durango	15.82	61.15	40.72	131.00	0.10
Guanajuato	2912.56	3579.74	3211.30	2262.50	1668.95
Guerrero	1883.87	2604.12	3300.78	2334.84	2157.30
Hidalgo	4596.02	3962.73	3903.36	4094.36	3899.23
Jalisco	7838.11	4547.02	3982.51	4335.85	1182.29
México	1159.53	597.24	521.07	630.06	304.49
Michoacán	10343.24	5393.54	5027.41	4730.42	1807.68
Morelos	333.59	386.38	456.86	179.81	87.89
Nayarit	305.44	797.77	505.45	816.80	298.56
Oaxaca	26566.00	25584.19	24146.94	25451.82	23190.35
Puebla	5068.06	3538.50	4293.92	4381.59	3632.53
Querétaro	1821.32	1535.19	1170.92	1735.01	673.59

Quintana Roo	39158.14	30421.86	30681.97	30499.23	28990.41
San Luis Potosí	6878.88	6930.75	6606.62	6446.17	3619.27
Sinaloa	15.93	276.69	347.98	534.39	4.69
Tabasco	3587.54	3635.52	3902.77	4116.39	2668.82
Tamaulipas	3571.97	4239.79	3960.92	4581.56	2620.61
Veracruz	30997.27	20135.70	21261.66	20890.68	18280.86
Yucatán	32653.51	29349.70	28848.72	29650.85	28360.32
Zacatecas	56.63	0.00	0.00	0.00	0.00
Suitability area (km2)	266716.63	221315.94	218282.73	219454.32	186929.24
Decrement area (km2)		45400.70	48433.90	47262.31	79787.39
Decrement (%)		17.02	21.88	21.65	36.36

Para el futuro lejano (2090), se espera una reducción de la distribución de la especie entre 21.65 y 36.36%, en comparación con la distribución actual (Ver Figura 1). En el escenario SSP1-2.6, se predice que Zacatecas pierda condiciones para la distribución de la especie. Además, en este escenario, Aguascalientes, Jalisco, México, Michoacán y Morelos pierden más del 50% de su distribución, con respecto a la distribución actual. Las variables que más contribuyeron en la construcción del modelo fueron: precipitación del trimestre más húmedo (42.6%), temperatura mínima del mes más frío (13.8%), el tipo de suelo (8.4%), estacionalidad de la temperatura (7.6%), precipitación del mes más seco (7.4%), y la temperatura del trimestre más frío (4.8%). Mientras que en el escenario SSP5-8.5, se pronostica una disminución de más de un tercio de la distribución de la especie, con respecto a la distribución actual. Zacatecas no presenta condiciones para la especie. Mientras que Durango y Michoacán perderán el 99 y 85% de su distribución, respectivamente. En este escenario Jalisco, México, Morelos, Querétaro y Sinaloa pierden más del 50% de la distribución de la especie. Las variables que más contribuyeron al modelo fueron: precipitación anual (21.7%), estacionalidad de la temperatura (16.9%), precipitación del trimestre más húmedo (16.1%), el tipo de suelo (8.9%), la altitud (7.3%), la precipitación del mes más seco (6.7%) y la temperatura del trimestre más frío (5.8%).

Para la recolección de las semillas de *C. odorata* se planeó realizarlas en poblaciones que por efecto del CC van a desaparecer. Por lo que se ubicaron en tres regiones del país (Cuadro 3): la zona sur, en el estado de Campeche que perderá hasta de 22% de condiciones óptimas para la especie, las poblaciones para coleccionar se ubican en el municipio de Candelaria; la zona centro, en el estado de Veracruz, que perderá más del 41% de superficie de la especie, las poblaciones para realizar colectas se ubican en el municipio de Chicontepec; y en la zona norte en poblaciones del Estado de Zacatecas, en

donde se pronostica que en un futuro no existan condiciones óptimas para la distribución de la especie, por lo que se espera que esas poblaciones desaparezcan.

Cuadro 3. Lugares de recolecta de semillas en poblaciones vulnerables al cambio climático.

Estado (región)	Municipio	Localidad	Coordenadas (UTM)	
			Latitud	Longitud
Campeche (sur)	Candelaria	Zacatonal	18.190708	-90.623186
Veracruz (centro)	Chicontepec	Las Güirras	21.067216	-98.101252
Zacatecas (norte)	Valparaíso	Los Tanques	22.603864	-104.058458

Costos de colecta y de almacenamiento de semillas para el periodo 2023 al 2050. El Cuadro 4 muestra a valores actuales (2023) los precios de las semillas colectadas en campo y almacenadas en las instalaciones del BS; asimismo el precio de esas semillas para el año 2050, utilizando para ello una proyección sobre el historial de la inflación en los últimos 25 años (tasa de 4.29% anual). Sólo existen dos precios: la región centro y la región norte y sur. Se destaca que, a precio actual, los costos de colecta representan el 72% de los costos totales o 257% más que por costos de almacenamiento. El precio de mercado de las semillas colectadas para el año 2050 sería del 3.4 veces **más en comparación a su precio actual (año 2023)**. Es importante señalar que el costo de almacenamiento se calculó en función al costo anual que representa para un BS, mantener una accesión en sus instalaciones, mientras que el costo de colecta es un valor en el momento o tiempo uno.

Cuadro 4. Actualización de costos de colecta y almacenamiento de semillas de *C. odorata* año 2023 y proyección 2050.

Concepto	Precios 2018		Precios 2023 ((p2018) (1+pminf) ⁵		Precios 2050 (p2023) (1+nflpro) ²⁷	
	Región norte y sur	Región centro	Región norte y sur	Región centro	Región norte y sur	Región centro
(1) Actividades de campo						
Payment (salary) for collection (one person)	33.06	27.26	41.28	173.34	128.31	538.83
Salary for one researcher (team leader) during collection	74.40	59.52	92.89	74.31	288.76	231.01
Food per person (three people)	66.14	53.12	82.58	66.32	256.70	206.17

Transportation to the northern region of the country (three people)	82.66	0.00	103.21	0.00	320.82	0.00
Transportation to the central region of the country (three people)	0.00	41.34	0.00	51.62	0.00	160.45
Transportation to the southern region of the country (three people)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Airfare (three people)	173.62	0.00	216.78	0.00	673.85	0.00
Other (equipment and materials for the trip)	57.86	55.86	72.24	69.75	224.57	216.80
Subtotal (1)	487.76	237.10	609.00	296.04	1893.01	1353.26
(2) Permisos y envío de semillas						
Local permits	24.80	20.84	30.96	26.02	96.25	80.88
Shipment of seeds	20.66	0.00	25.80	0.00	80.19	0.00
Subtotal (2)	45.46	20.84	56.76	26.02	176.44	80.88
TOTAL= (1) + (2)	533.22	257.94	665.76	322.06	2185.04	1514.18
(3) Tratamiento de muestras, pruebas de viabilidad, germinación y almacenamiento						
Subtotal (3)	173.34		216		671.44	
TOTAL= (1) + (2) + (3)	706.56	43.128	882.18	538.48	2740.89	2105.58

Fuente: Elaboración propia, datos actualizados (2022) de la memoria de costos de colecta y de almacenamiento del trabajo de Rodríguez-Zúñiga et al. (2022). P2018= precios o cantidades del 2018; pminf= promedio de la inflación de cuatro periodos; infipro= inflación proyectada 2050.

Cálculo de la tasa de movimiento del valor de la producción forestal de *C. odorata* L. para el año 2050 ante escenario de CC o tasa de escasez: el Cuadro 5 resume las posibles pérdidas (USD) por reducción del área de distribución de *C. odorata*, consideran las series de tiempo 1993-2018 (CONAFOR-SEMARNAT, 2019), del VPF. Para ello se utilizó el promedio de tres modelos de proyección. En ese sentido, para mantener el proceso normal del valor de la producción de *C. odorata* para el año 2050 (de 753,064 (USD) a 936.064 (USD)) se requiere una tasa de cambio o de movimiento de 1.24% (r).

Cuadro 5. Valor de la producción forestal de madera preciosa según escenarios de cambio climático.

Modelo de proyección	VPFtp ₂₀₅₀ (USD)	VPFc(1/3) ₂₀₅₀ (USD)	PPFce ₂₀₅₀ (USD)		
			ES (-21.88%)	EC (-17.02)	Promedio (ES+EC)/2
Lineal (R ² = 0.058)	3,368,240	1,122,747	877,089.696	930,839.441	903,964.569
Logarítmico (R ² = 0.14)	1,578,947	526,316	411,157.799	436,354.34	423,756.07
Potencial (R ² = 0,21)	3,477,388	1,159,13	905,511.835	961,003.344	933,257.589
Promedio	2,808,192	936,064	731,253	776,066	753,659

Donde: VPFtp₂₀₅₀ = valor de la producción forestal total de maderas preciosas proyectada para el año 2050; ES= escenario severo (reducción de 21.88 %), EC= escenario conservador (reducción de 17.02%); VPFcd(1/3)₂₀₅₀ = participación en el valor de la producción forestal de la especie *C. odorata* proyectada para el año 2050 (una tercera parte, Romo-Lozano et al., 2017); PPFce₂₀₅₀ = pérdidas por reducción de áreas promedio de *C. odorata* por de cambio climático.

Fuente: Elaboración propia.

Valor de la semilla almacenada para el año 2050: el Cuadro 6 resume el valor de la semilla almacenada o adquisición de *C. odorata* para el año 2050 (VSc2050), con una tasa de interés de 8.24: 7% por costo de oportunidad o tasa recomendada por BANXICO (2022), para proyectos productivos más un 1.24 % por la tasa sostenida para mantener el valor de la producción de *C. odorata* para el año 2050. Para el año 2050 estas tendrán 9 veces mayor a su valor actual. Mientras que su valor presente a precios de mercado es 14.5 veces más, ya que los PSTF ofertan a 51.0 (USD) una adquisición o un kilogramo de semilla. Ellos no distinguen el tipo de presentación. Y para ese año con una tasa de inflación proyectada del 4.29%, el precio de mercado de una adquisición sería de 310% más en comparación a su precio actual (51.0 USD).

Cuadro 6. Valor de la semillas almacenadas para el año 2050.

Ubicación de poblaciones de <i>Cedrela odorata</i> (coordenadas UTM)	Región	CTCA (USD)	VSc2050 (USD)	PSI 2050
Campeche: Longitud 18.190708 Latitud -90.623186	Sur	882.18	7, 482.16	158.53
Veracruz: Longitud 21.067216 Latitud -98.101252	Centro	538.48	4,567.09	158.53
Zacatecas: Latitud 22.603864 Longitud -104.058458	Norte	882.18	7,482.16	158.53
Promedio		767.61	6,510.47	158.53

Donde: CTCA= costos totales de colecta y de almacenamiento; VSc2050= Valor de la semilla de *C. odorata* en el año 2050; PSI= precio de la semilla en el mercado con tasa de inflación proyectada año 2050.

4. DISCUSIÓN

Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático. El modelo de distribución actual de *C. odorata* coincide con la distribución del bioma del bosque tropical húmedo y parte del bosque tropical estacionalmente seco en Chihuahua, Sonora, Durango y Sinaloa (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023). Los modelos de distribución actual obtenidos en este trabajo coinciden con los reportados por Hernández-Ramos *et al.* (2018) y de Sampayo-Maldonado *et al.* (2023). Las variables que más contribuyeron al modelo de distribución de la especie fueron: precipitación anual, rango de temperatura anual, precipitación del mes más seco y precipitación del trimestre más húmedo, con un aporte del (70%). Y coinciden con las variables para el modelado del nicho ecológico para esta especie de acuerdo con Hernández-Ramos *et al.* (2018) y Sampayo-Maldonado *et al.* (2023). A su vez, los resultados son comparables a la distribución potencial en México del hábitat climático óptimo para *S. macrophylla* (clasificada en la misma familia, Meliaceae) (Sampayo-Maldonado *et al.* 2023).

Los modelos de la distribución potencial para *C. odorata*, de acuerdo con el modelo de la NASA (GISS-E2-1-G), se espera la disminución de la distribución óptima en más del 36%. Se optó por utilizar este modelo por su resolución adecuada para estudios de impacto regional (Montero-Martínez *et al.* 2013). Por lo que las proyecciones tuvieron buen ajuste ($AUC > 0.92$) en función del área bajo la curva. Las variables que más contribuyeron a la construcción de los modelos para la distribución de la especie fueron la precipitación anual, precipitación del trimestre más húmedo y la temperatura mínima del mes más frío. No obstante, con el escenario de CC se espera que el régimen de lluvias cambie, lo que va a intensificar la evaporación del agua del suelo y su capacidad para retener agua, lo que puede extender las sequías. El estrés por sequía va a limitar la distribución geográfica de la especie. Como una estrategia para conservar la diversidad genética de las poblaciones amenazadas por el CC, es importante recolectar semillas en las regiones que perderán condiciones adecuadas para la distribución de la especie.

C. odorata se propaga principalmente por semillas, son del tipo ortodoxas y no presentan latencia. Por lo que es importante analizar las respuestas de las semillas a las condiciones ambientales cambiantes, ya que los procesos fisiológicos involucrados en el crecimiento y desarrollo de los árboles están fuertemente influenciados por la temperatura ya que afecta los mecanismos hormonales implicados en la floración y fructificación, lo que va a impactar en la dispersión y por ende modelar la distribución de las especies. Por lo que este estudio sienta las bases para desarrollar estrategias para la conservación de semillas de poblaciones vulnerables al cambio climático.

Costos de colecta y de almacenamiento de semillas para el periodo 2018 al 2050.

Costos de colecta es una metodología utilizada en valoración económica de los recursos naturales. Uno de los principales retos de esta metodología es identificar una o varias variables que estén regidas por reglas del mercado. Por ejemplo, sin considerar las externalidades -principal debilidad del método-, el costo de contaminar un manglar por desechos sólidos municipales es el valor que las empresas cobran por la recuperación de esos desechos (externalidad: no se considera el costo por el impacto ambiental por desechos sólidos) (Ibarrarán *et al.* 2003). Para el caso de especies forestales, existen empresas (PSTF) que colocan en el mercado semillas colectadas de especies con características deseables (e. g. resistentes, adaptables, productividad etc.). Sin embargo, ante la exigencia de calidad del germoplasma para formar una accesión digna de almacenarse en un BS, éstas organizaciones anteponen la cantidad más que la calidad, siendo sus costos muy por debajo de una muestra que se va almacenar en un BS (USD \$51.0 con respecto USD %767.61). Por otro lado, el valor de la semilla obedecerá a su productividad. Por ejemplo, el valor del germoplasma de “palmito” almacenada en un BS, dependerá del rendimiento de esa variedad por hectárea (Mora *et al.* 1999). Desde el punto de vista ambiental el germoplasma tendrá un valor excedente que tendría que valorarse bajo otros criterios a efecto de reducir las externalidades. Esto también aplica para la semilla de *C. odorata*: especies valiosa no solo desde el punto de vista económico, sino también por su gran importancia ambiental. El precio futuro de mercado de la semilla (productos forestal no maderable) como de la madera (productos forestales maderables) no sólo dependerá de factores como la inflación (e.g. tasa de inflación proyectada de 4.29%) sino también a su abundancia o escasez. En ese sentido el incremento de la demanda (e.g. madera precisa muy apreciada, alto crecimiento anual e importante en la captura de carbono, germoplasma de poblaciones resistente a altas temperaturas, etc.) y su baja oferta aumentarán considerablemente su precio de mercado (Rodríguez-Zúñiga *et al.* 2022; Sampayo-Maldonado *et al.* 2023).

Cálculo de la tasa de movimiento del valor de la producción forestal de *C. odorata* L. para el año 2050 ante escenario de CC o tasa de escases: en cuanto a la metodología para calcular la tasa de interés del 8.24%, es similar al trabajo de Rodríguez-Zúñiga *et al.* (2022) (a), para especies forestales del género *Pinus* ante escenarios de CC. Asimismo se encuentra en el rango reportado por otros trabajos referentes a la conservación de germoplasma *ex situ* en un periodo de 25 años (1987-2022): 11% para la inversión en el mejoramiento y almacenamiento de semillas forestales comerciales por parte del Sistema Nacional para la Conservación de los Recursos Fitogenéticos del

Gobierno de los Estados Unidos (SNCRF-EU); 5.6% sobre las ganancias de almacenar el germoplasma de árboles frutales (Evenson *et al.* 1998); 5.0% utilizada por el Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y el Trigo (CIMMYT) (Pardey *et al.* 1999); 8.84 y 7.0 por almacenamiento de semillas de especies de *Pinus* y árboles nativos de México respectivamente en un BS ante escenarios de escasez por Cambio Climático (Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2022(a); Rodríguez-Zúñiga *et al.* 2022 (b)).

La tasa de interés dependerá de los costos de oportunidad derivados de la productividad, importancia ambiental del recurso biológico almacenado o eventos adversos. La alta tasa de SNCRF-EU, según la FAO (1996), es porque este país es altamente competitivo, siendo una de las tres principales naciones que dominan la producción forestal global. En México y en el mundo el germoplasma de *C. odorata* tendría que tener un alto valor económico (e. g. madera preciosa) y ambiental (e. g. captura de carbón) (Romo-Lozano *et al.* 2017). De acuerdo a un inventario en el año 2017 de madera en pie de *C. odorata* el valor estimado fue de USD \$288, 328,788 (Romo-Lozano *et al.* 2017) por lo que si se considera que sus áreas se reducirán en promedio 19.5% y con una tasa sostenida por escases del 2.4% para el año 2050, las pérdidas estimadas serian de casi USD\$ 109,224,836 lo anterior sin tomar en cuenta los diversos beneficios ambientales que esta especie genera.

Valor de la semilla almacenada para el año 2050: en cuanto a su valor presente en el mercado con respecto a un BS la diferencia se debe a que, éste último requiere de un trabajo detallado de colecta por especialistas, estudios de biodiversidad, ensayos periódicos de viabilidad y una infraestructura con instalaciones más complejas. Las ventas de semillas por PSTF están diseñadas para maximizar ganancias y disminuir los costos, priorizando el volumen recolectado sobre la calidad del material biológico (la organización prefiere vender por kilogramo con respecto a una accesión). Es importante señalar que, para el periodo de evaluación no se consideró el valor presente de la accesión ante la erosión de la viabilidad de la semilla ni los costos beneficios por la escasez del recurso (e. g. valor económico y ambiental por la reducción y perdidas de calidad del suelo forestal de *C. odorata*), así mismo escenario de variación de tasa de interés por costos de oportunidad (inflación, escenarios adversos del BS, etc.,) (Brambila 2006). En cualquiera de los casos, diversos autores (Evenson *et al.* 1998, De-Zhu Li y Hug 2009) consideran que cualquier inversión que se haga en investigación y conservación de los recursos filogenéticos en un BS son pocos, y que los beneficios económicos en términos de rentabilidad (beneficio marginal) siempre serán mayores al compararlos con el gasto de operación de un BS (costo marginal). En ese sentido la tasa de interés podrá incrementar y en ello el precio

en el mercado de semillas en un periodo largo (28 años) por almacenamiento. Por lo que en futuras investigaciones habrá que considerar las variables arriba señaladas tomando como base este trabajo.

Las semillas colectadas y conservadas ya sea *in situ* o *ex situ* pueden tener un valor agregado en el mercado para la agroforestería o restauración ecológica. Las experiencias en Brasil indican que los grupos socioculturales menos integrados con el mercado (e, g. los pueblos indígenas o campesinos) logran mejores resultados de sustento a través de la participación en el mercado de semillas (Urzedo *et al.* 2016). Así mismo en Sahel (África), con altos niveles de participación comunitaria, se priorizaron las especies mejor adaptadas al medio y de mayor importancia económica, posteriormente se recolectaron semillas de calidad y se produjeron plántulas para restaurar con éxito suelos degradados (Sacande y Berrahmound 2016). En México se ha documentado que, el mejor manejo de recursos forestales maderables y no maderables lo realizan empresas forestales comunitaria (EFC) (Rodríguez *et al.* 2022). En ese sentido para la conservación *in situ*, este trabajo puede ser referencia para: a) los dueños de los terrenos forestales o EFC y PSTF para dar valor agregado al germoplasma. Hay un costo de oportunidad por conservar *in situ*, ya sea a través de huertos semilleros o unidades forestales destinadas a producir semillas de especies comerciales o de restauración. Estas empresas pueden ahora cuantificar a través de este método propuesto un precio real o valor agregado de sus recursos forestal no maderable (e.g. semillas de *C. odorata* con características de poblaciones con una alta adaptabilidad a temperaturas más altas); b) el gobierno federal el cual es responsable del resguardo del patrimonio natural, este estudio representa un soporte para elaborar políticas públicas con visión estratégica anticipando posibles eventos (e.g. prevención, promoción y destinación de recurso para la conservación *in situ* y *ex situ* de especies forestales amenazadas por CC; c) para un BS con fines de conservación ya que, por el hecho de conocer el valor unitario de una accesión, disminuye los costos de oportunidad para proyectos en mejorar o ampliar sus instalaciones; asimismo inversión justa para su operación; y d) para la sociedad en general y academia, este es uno de los pocos trabajos que establece una metodología para evaluar *ex situ* los recursos forestales ante escenarios adversos.

La conservación *in situ* y *ex situ* representa una opción para que la sociedad, el gobierno y los propietarios de bosques manejen o conserven los recursos genéticos, al mismo tiempo les permite a los empresarios obtener ganancias. Es importante considerar que este estudio no incluye la medición monetaria de las ganancias o pérdidas de bienestar generadas por la conservación *ex situ* en un BS con las características propuestas. Sin

embargo, para estudios futuros de esta especie (*C. odorata*) u otras de importancia ambiental y económica, representa una propuesta metodológica y componente importante de un sistema del análisis de costos beneficios para la conservación de muestras de semillas en un BS.

5. CONCLUSIONES

C. odorata se verá afectada por el cambio climático, por lo que perderá condiciones óptimas para su distribución. En el futuro cercano (2050), se espera una reducción de la distribución de la especie de 17.02 y 21.88% respectivamente y para el futuro lejano (2090), entre 21.65 y 36.36% en comparación con la distribución actual. Por lo que se recomienda realizar colectas de semillas de la especie provenientes de zonas que serán afectadas por CC (e.g, de las tres regiones de colecta propuestas por este trabajo). Esta es una estrategia para la conservación de las poblaciones que se verán afectadas. En un Banco de Semillas en una Institución con infraestructura para fines de investigación y conservación en el centro de la República Mexicana, el valor de una accesión de *C. odorata* en el tiempo uno de almacenamiento, es 14.5 veces más que su precio en el mercado. Considerando una tasa de interés nominal de 8.24% en un periodo de 28 años (2050), el valor de una accesión será de 9 veces más que su valor presente. Y con una tasa de inflación proyectada de 4.29%, su precio en el mercado de las semillas en ese mismo periodo será de 3.1 veces más con respecto a su precio actual. Debido a la importancia ambiental y económica de *C. odorata*, este último valor (precio de mercado de las semillas) se incrementará en función del crecimiento de la demanda de la especie (principalmente por su alto interés en el mercado de las maderas preciosas y especie forestal importante en la captura de carbón) y baja oferta o escasez del germoplasma resistente al CC.

A pesar de los costos asociados con el mantenimiento y operación de un BS se resalta la contribución de estas instituciones para los empresarios, el gobierno y sociedad en general. Cualquier costo de inversión con fines para conservar el germoplasma *in situ* o *ex situ* siempre será menor a los beneficios que se pueden obtener por dichas acciones.

Este trabajo es referente para que un BS con objetivos arriba señalados estimen el valor de sus inventarios (de accesiones) y justificar los gastos de operación para su buen funcionamiento y en ese sentido, gestionar apoyos justos del Gobierno o instituciones nacionales e internacionales, ya que la preservación de especies forestales amenazadas ante escenarios adversos es un patrimonio natural universal. Asimismo para extender el periodo de almacenamiento para otras especies con una tasa de interés mayor o igual a 8.24%.

REFERENCIAS

BANXICO. 2022. Certificados de La Tesorería de La Federación. Consultado 8 de agosto 2022. Disponible en <https://www.banxico.org.mx/>.

Brambila P. 2006. Bioeconomía: instrumentos para análisis económico. Edo México, Mexico, Sagarpa-Colpos. 284 p.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). Red Mundial de Información Sobre Biodiversidad (REMIB). (2015). Consultado 11 de abril. Disponible en 2022. http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib_esp.html.

CONAFOR-SEMARNAT (Comisión Nacional Forestal-Secretaría del Medio Ambiente and Recursos Naturales). 2019. Inventario Nacional Forestal y de Suelo. Consultado 12 febrero 2022. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/772>.

De-Zhu Li, WP Hug. 2009. The science and economics of ex situ plant conservation. *Trends in Plant Science* 14 (1): 614-621.

Evenson R, D Gollin, V Santaniello. 1998. Agricultural values of plant genetic resources. Wallingford, UK. CABI. 304 p.

FAO (Food and Agriculture Organization). 1996. Report on the State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. Leipzig, Germany. FAO. 82 p.

Fernández-Eguiarte A, J. Zavala-Hidalgo, R. Romero-Centeno, AC Conde-Álvarez, RI Trejo-Vázquez. 2015. Actualización de los Escenarios de Cambio Climático Para Estudios de Impactos, Vulnerabilidad and Adaptación en México and Centroamérica; Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología and Cambio Climático, Ciudad de México, México. Secretaría de Medio Ambiente and Recursos Naturales-Instituto de Geografía, UNAM. 303 p.

Hernández-Ramos J, R Reynoso-Santos, A Hernández-Ramos, X García-Cuevas, E Hernández-Máximo, JV Cob-Uicab, D Sumano-López. 2018. Historical, current and future distribution of *Cedrela odorata* in Mexico. *Acta Botánica Mexicana* 124 (1): 117-134.

Hijmans RJ, SE Cameron, JL Parra, PG Jones, A Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25(1): 1965-1978.

Ibarrarán V, C Islas, E Mayett. 2003. Valoración económica del impacto ambiental del manejo de residuos sólidos municipales: estudio de caso. *Gaceta Ecológica* 67(1): 69-82.

Kameswara N, J. Hanson, M Ehsan, K Ghosh, D Nowell, M Larinde. 2007. Manual Para el Manejo de Semillas en Bancos de Germoplasma. Roma, Italy. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación and la Agricultura (FAO). 182 p.

Montero-Martínez MJ, W Ojeda-Bustamante, JS Santana-Sepúlveda, R Prieto-González, R Lobato-Sánchez. 2013. Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. *Tecnología Y Ciencias Del Agua* 4(2): 113-128. <https://www.revistatyc.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/356>

Mora U, A Bogantes, C Arroyo. 1999. Cultivares de pejibaye para palmito. In J Mora, J Gainza eds. Palmito de pejibaye (*Bactris gasipaes* K.) su cultivo e industrialización. San José, Costa Rica. Editorial U.C.R. p. 41-47.

Pardey PG, B Skomand, S Taba, ME Van Dusen, BD Wright. 1999. The cost of conserving maize and wheat genetic resources ex situ. In M Smale eds. Farmers, gene banks and crop breeding economic analyses of diversity in wheat, maize and rice, Edo México, México. CIMMYT/Kluwer Academic Publishers. p. 35-55.

Parmesan C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. Annual Review of Ecology. *Evolution, and Systematics* 37 (1): 637-669.

Peterson AT, J Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modelling *Ecol. Modell* 213(1): 63-72.

Phillips SJ, RP Anderson, M Dudík, RE Schapire, ME Blair. 2017. Opening the black box: An open-source release of MaxEnt. *Ecography* 40(1): 887-893.

PEF (Poder Ejecutivo Federal). 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Consultado 07 de abril 2023. Disponible en <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>

Pradhan S. 2011. Retailing Management: Text and Cases; New York, USA. Tata McGraw-Hill Education. 613 p.

Rodríguez-Zúñiga J, CM Flores-Ortiz, MJ González-Guillén, R. Lira-Saade, NI Rodríguez-Arévalo, P Dávila-Aranda, T Ulian. 2022(a). Cost Analysis of Seed Conservation of Commercial Pine Species Vulnerable to Climate Change in Mexico. *Forests* 13(1): 2-14. <https://doi.org/10.3390/f13040539>.

Rodríguez-Zúñiga J, MJ Gozález-Guillén, H Bautista-Santos, F Sánchez-Galván. (2022) (b). Cost Analysis of Collection and Ex Situ Conservation of Seeds of Important Native Tree Species of Mexico. *Forests* 13(1): 1-13. <https://doi.org/10.3390/f13111958>.

Romo-Lozano JL, JJ Vargas-Hernández, J López-Upton, ML Ávila-Angulo. 2017. Estimate of the financial value of timber stocks of red cedar (*Cedrela odorata* L.) in Mexico. *Madera y Bosques* 23(1): 111-120.

Sacande M, N Berrahmouni. 2016. Community participation and ecological criteria for selecting species and restoring natural capital with native species in the Sahel. *Restoration Ecology* 24(1): 479-488.

Sáenz-Romero C, H Viveros-Viveros, R Guzmán-Reyna. 2004. Altitudinal genetic variation among *P. oocarpa* populations in Michoacán, western México. Preliminary results from a nursery test. *Forest Genetics* 11(3-4): 341-349.

Sampayo-Maldonado S, CA Ordoñez-Salanueva, E Mattana, M, Way, E. Castillo, PD Davila-Aranda, R Lira-Sadde, O Téllez-Valdés, NI Rodríguez-Arevalo, T Ulian, CM Flores-Ortiz. 2023. Potential Distribution of *Cedrela odorata* L. in Mexico according to Its Optimal Thermal Range for Seed Germination under Different Climate Change Scenarios. *Plants* 12 (1): 150. <https://doi.org/10.3390/plants12010150tra>

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2010) NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Consultado 07 de abril 2023. Disponible en <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>

Urzedo DI, E Vidal, EO Sills, FCM Piña-Rodrigues, RGP Junqueira. 2016. Tropical Forest Seeds in the Household Economy: Effects of Market Participation among Three Sociocultural Groups in the Upper Xingu Region of the Brazilian Amazon. *Environmental Conservation* 43(1): 13-23. doi:10.1017/S0376892915000247.

CAPÍTULO 10

CALCIUM CARBONATE APPLIED TO THE SUBSTRATE AND FOLIAR SPRAY IN TOMATO AND BELL PEPPER¹

Data de submissão: 20/06/2025

Data de aceite: 11/07/2025

Juan Manuel Soto Parra²

Agrotechnological Science Department
Autonomous University of Chihuahua
Chihuahua, México

<https://orcid.org/0000-0003-3867-9904>

Esteban Sánchez Chávez

Food and Development Research
Center - Delicias Unit
Chihuahua, México

<https://orcid.org/0000-0002-6845-4290>

Omar Cástor Ponce García

Delicias Experimental Field
CIRNOC-INIFAP-SADER

<https://orcid.org/0000-0003-3931-9003>

Rosa María Yáñez Muñoz

Agrotechnological Science Department
Autonomous University of Chihuahua
Chihuahua, México

<https://orcid.org/0000-0001-5571-0139>

Nubia Guadalupe Torres Beltrán

Agrotechnological Science Department
Autonomous University of Chihuahua
Chihuahua, México

<https://orcid.org/0009-0006-3943-3219>

Julio César Oviedo Mireles

Agrotechnological Science Department
Autonomous University of Chihuahua
Chihuahua, México

<https://orcid.org/0000-0001-9798-8067>

Linda Citlalli Noperi Mosqueda

Agrotechnological Science Department
Autonomous University of Chihuahua
Chihuahua, México

<https://orcid.org/0000-0001-7607-467X>

ABSTRACT: The objective was to determine if the applications of calcium carbonate to the substrate and foliar spray influence the color and the quality of the tomato and bell pepper grown under greenhouse. The work was carried out in a 300 m² greenhouse, 'Closter' tomato and 'Canon' bell pepper plants were used, in both species a factorial experiment 5² bounded to 13 treatments to evaluate linear, quadratic response surface and factor interaction. In both crops, the application concentrations of calcium carbonate to the substrate ranged from 0 to 12800 kg ha⁻¹, while foliar spray ranged from 0 to 15.36 kg ha⁻¹, the variables evaluated were color L* a* b*, polar diameter and equatorial diameter. In tomato

¹ Project: Development of an Agricultural Calcium Amendment Based on a Byproduct Generated by the Cement Industry CONACYT-PROINNOVA, Cements of Chihuahua Group, Autonomous University of Chihuahua.

² Corresponding autor

fruit affected more red they were treated with 6269.7 kg ha⁻¹ CaCO₃ to the substrate without foliar spray, to have more elongated fruits and wider is necessary to increase the amount of calcium carbonate in foliar sprays; in bell pepper, the most polar diameter was obtained 10,635.0 kilograms per hectare with foliar spray of 1.9 kilograms per hectare, the brightest fruits were achieved with an application of calcium carbonate to the substrate of 226.5 kilograms per hectare and foliar spray 14.3 kilograms per hectare.

KEYWORDS: 'Closter' tomato; 'Canon' bell pepper; color L*a*b*; fruit size; response Surface.

1. INTRODUCCION

Calcium is an important nutrient to increase the quality and yield in fruit and vegetable crops. The symptoms of the lack of calcium in the fruits of tomato and bell pepper are the apical rot, burns in the new growths and death in the points of growth so much in the roots as in the shoots. During the ripening of the fruits of the tomato and sweet pepper the quality properties are affected such as firmness, diameter of the fruit, color and the shelf life is reduced, but with the applications of calcium carbonate to the soil and foliar before the pinch of the fruits you can improve these quality parameters.

Open field crops with acid soils and high salt content, calcium deficiency in fruits is more common. Cultures in calcareous soils (high in CaCO₃) require calcium intake, because this element is not necessarily available to plants as it has low solubility.

The quality of the fruits of the bell pepper and fresh tomato is evaluated using the intensity of the red color as a basic criterion. This determination was made using a Minolta L*, a* and b* reflection colorimeter, which is based on the use of trigonometric functions. In the CIE-L*a*b* color measurement system, the L* coordinate measures darkness to light, a* represents red if it is positive and green if it is negative, b* corresponds to yellow if it is positive and blue if it is negative.

The CIE-L* a* b* color space describes all the colors that the human eye can perceive from its three coordinates: L* a* b* and is accepted internationally to evaluate the color in food and other products industrialized (León *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2009; Jha *et al.*, 2010; Pathare *et al.*, 2013). Another of the systems used to transmit color values is the CIE space L* C* h*, which is a polar representation of the CIE system L* a* b*, with cylindrical coordinates (L* C* h*) instead of rectangular coordinates (McGuire, 1992; Carvajal *et al.*, 2011; Pathare *et al.*, 2013).

Although calcium is classified as a secondary nutrient, it is involved in numerous biochemical and morphological processes of plants and has been implicated in many physiopathies of considerable economic importance for the post-harvest production and quality of fruits and vegetables.

The color of the fruit is an external characteristic and a method to determine the degree of ripening of fruits and vegetables, the objective of this study was to determine if applications of calcium carbonate to the soil and foliar during pre and post harvest influence the color of the epicarp and the quality of the fruit of tomato and bell pepper grown under greenhouse.

2. MATERIALS AND METHODS

The work was carried out in a 300 m² greenhouse, equipped with extractors, wood-based central heating, drip irrigation system, moderately automated. ‘Closter’ tomato and ‘Canon’ bell pepper plants were used, both planted in pen-type substrate bags with 3 plants for each bag 100 cm long X 15 cm high X 20 cm wide, with an approximate weight of 3 kg capacity. In both species a factorial experiment 5² bounded to 13 treatments was used, each treatment consisted of 5 repetitions and in turn each repetition of two bags (pens) with three plants each (Table 1). The application levels for each type (substrate and foliar) were divided into four separate applications spaced 7 days, the variables evaluated were color L* a* b*, polar diameter and equatorial diameter.

Table 1. Factors and levels for foliar and substrate applications in tomato and bell pepper.

Factors	levels				
	1	2	3	4	5
Tomato					
Calcium Carbonate kg (CaO) ha ⁻¹ (Substrate)	0.0	1600	3200	6400	12800
Calcium Carbonate (Ca) kg ha ⁻¹ (Foliar)	0.0	1.92	3.84	7.68	15.36
Bell pepper					
Calcium Carbonate kg (CaO) ha ⁻¹ (Substrate)	0.0	1600	3200	6400	12800
Calcium Carbonate (Ca) kg ha ⁻¹ (Foliar)	0.0	1.92	3.84	7.68	15.36

3. RESULTS AND DISCUSSION

Color changes in ripe fruits take place as a result of the degradation of chlorophyll and an increase in carotene content. The tomato fruits that presented a greener color (a* = -4.0) were with a dose of calcium carbonate of 6,400.0 kg ha⁻¹ to the substrate and 7.7 kg ha⁻¹ foliar, progressively increasing the red color to the coordinate a* of 2.0 with calcium carbonate to the soil 6,269.7 kg ha⁻¹ while the leaf decreased to 0.0 kg ha⁻¹ (Table 2). The a* color in red pepper decreased from 22.7 to 22.5 in red, which implied a decrease in calcium carbonate applied to the substrate to 1,842.9 kg ha⁻¹ and an increase in foliar applications to 13.0 kg ha⁻¹.

Table 2. Maximum^x response surface for color a* in tomato and bell pepper.

Tomato				Bell pepper			
Regression		factors		Regression		factors	
		CaCO ₃ Substrate	CaCO ₃ Foliar			CaCO ₃ Substrate	CaCO ₃ Foliar
		0.5645 ^w	0.1183			0.5828	0.1173
Lineal (L)	0.1574 ^w			Lineal (L)	0.1450		
Cuad. (C)	0.1810			Cuad. (C)	0.1177		
Products	0.6470			products	0.5683		
Model	0.2124	R ² 0.5760 CV -112.86	μ -2.2	Model	0.1559	R ² 0.6198 CV 24.17	μ 17.1
Color	SE ^z	Kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Color	SE	Kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
-4.0	1.49	6400.0	7.7	22.7	2.49	6400.0	7.7
-3.7	1.45	6256.2	6.9	23.1	2.51	6187.7	8.4
-3.4	1.40	6198.1	6.2	23.3	2.51	5906.5	9.1
-3.0	1.35	6176.1	5.4	23.5	2.47	5555.3	9.7
-2.5	1.30	6172.0	4.6	23.6	2.42	5138.8	10.4
-1.9	1.24	6178.0	3.8	23.6	2.35	4666.8	10.9
-1.3	1.23	6190.2	3.1	23.5	2.27	4151.0	11.4
-0.6	1.26	6206.5	2.3	23.4	2.20	3602.6	11.9
0.2	1.36	6225.7	1.5	23.1	2.16	3030.7	12.3
1.0	1.53	6246.9	0.8	22.8	2.17	2442.5	12.7
2.0	1.77	6269.7	0.0	22.5	2.24	1842.9	13.0
Predicted fixed point		critical values decrypted		Predicted fixed point		critical values decrypted	
-4.20		4768.57	9.79	23.58		4907.26	10.64

^xRidge analysis; μ Overall mean, C.V. Coefficient of variation, R² Coefficient of determination. ^wprobability of F: Pr ≥ 0.05 Not significant, Significant 0.05 ≤ Pr ≤ 0.01, highly significant Pr ≤ 0.01 Y Response (Pr > | t |) significant linear (L), quadratic (C), significant products of that nutrient with the rest; ^zStandard error.

The color a* in bell pepper Table 2, indicates that to increase from a value of 22.7 to 23.6 4% increase, in the application of calcium carbonate to the substrate from 6400.0 to 4666.8 kg ha⁻¹ it is necessary decrease 37%, and an increase in foliar from 7.7 to 10.9 L ha⁻¹. From a color a* of 23.6 there is a decrease of the red color to 22.5 with a decrease in the amount of calcium carbonate applied to the substrate 1842.9 kg ha⁻¹ and an increase in foliar applications to 13.0 L ha⁻¹.

In Table 3, the response surface for color b in tomato and bell pepper yields the following values, the general average for color in tomato was 27.4 with a coefficient of

determination R^2 0.5601 and a coefficient of variation of 3.14. The bell pepper presented a color average of 13.8 and a coefficient of determination R^2 0.5808 and a coefficient of variation of 7.24. The factors are applications of CaCO_3 to the soil and foliar, with different levels.

In tomato, the range in color b^* fluctuated from 27.0 to 28.4 increase 5%, with an increase of calcium carbonate from 6400.0 to 7525.8 Kg ha^{-1} increase to the substrate by 18% and a decrease of foliar CaCO_3 from 7.7 to 0.1 L ha^{-1} . This indicates that the fruit enters a ripening stage so that the yellow color increases as the tomato fruit matures.

Table 3. Maximum^x response surface for color b^* in tomato and bell pepper under greenhouse conditions, treated with calcium carbonate in substrate and leaf application

Tomato				Bell pepper			
Regression		factors		Regression		factors	
		CaCO_3 Substrate	CaCO_3 Foliar			CaCO_3 Substrate	CaCO_3 Foliar
		0.9681 ^w	0.9415			0.3622	0.2386
Lineal (L)	0.1004 ^w			Lineal (L)	0.1106		
Cuad. (C)	0.8141			Cuad. (C)	0.2472		
products	0.2014			products	0.7268		
Model	0.2350	R^2 0.5601 CV 3.14	μ 4.27	Model	0.2057	R^2 0.5808 CV 7.24	μ 13.8
Color b	SE ^z	Kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	Color b	SE	Kg ha^{-1}	kg ha^{-1}
27.0	0.52	6400.0	7.7	14.8	0.60	6400.0	7.7
27.1	0.51	6348.6	6.9	14.9	0.61	6011.0	8.3
27.2	0.49	6367.5	6.1	15.0	0.60	5612.1	8.9
27.4	0.47	6436.7	5.4	15.0	0.59	5204.4	9.5
27.5	0.45	6541.4	4.6	15.1	0.58	4788.6	10.1
27.6	0.44	6671.5	3.9	15.1	0.56	4365.5	10.6
27.8	0.44	6820.3	3.1	15.1	0.55	3935.8	11.2
27.9	0.45	6982.9	2.3	15.1	0.53	3499.9	11.8
28.1	0.48	7156.2	1.6	15.1	0.52	3058.6	12.3
28.3	0.53	7337.7	0.9	15.1	0.53	2612.2	12.9
28.4	0.61	7525.8	0.1	15.1	0.54	2161.2	13.4
Predicted fixed point		critical values decrypted		Predicted fixed point		critical values decrypted	
	26.89	-2.54	11.23		15.13	3550.4	11.71

^xRidge analysis; μ Overall mean, C.V. Coefficient of variation, R^2 Coefficient of determination. ^wprobability of F: $\text{Pr} \geq 0.05$ Not significant, $0.05 \leq \text{Pr} \leq 0.01$, highly significant $\text{Pr} \leq 0.01$ Y Response ($\text{Pr} > |t|$) significant linear (L), quadratic (C), significant products of that nutrient with the rest; ^zStandard error.

The color b^* in bell pepper Table 3, indicates that to increase from 14.8 to 15.1 by 2% it is necessary to reduce calcium carbonate from 6400.0 to 2161.2 kg ha⁻¹ by 66%, increasing foliar carbonate from 7.7 to 13.4 L ha⁻¹ in 74%. In the red pepper, the increase in yellow color is related to the decrease in calcium carbonate to the soil and an increase in foliar applications.

In Table 4, the response surface for color L^* in bell pepper and tomato, gave as a response a general average of 54.0 in color L^* , a coefficient of determination of R^2 0.4233 and a coefficient of variation of 7.92 in tomato. In bell pepper I present a general average of 34.7 in color L^* , coefficient of determination R^2 0.5447 and coefficient of variation 2.12.

In the tomato crop, the following CaCO_3 factors were carried out on the substrate and foliar with different levels, resulting in the treatment of 6400.0 Kg ha⁻¹ to the soil and 7.7 L ha⁻¹ foliar of CaCO_3 , which presented the fruits brighter, but by increasing the CaCO_3 to the ground to 12704.0 kg ha⁻¹ and decreasing the CaCO_3 to a level of 6.4 L ha⁻¹, fruits with less bright were obtained. So, to obtain brighter fruits in tomato it is necessary to increase the CaCO_3 to the ground by 99%, and decrease the amount in foliar applications by up to 17%.

Table 4. Maximum^x response surface for color L^* in tomato and bell pepper under greenhouse conditions, treated with calcium carbonate in substrate and leaf application.

Tomato				Bell pepper			
Regression		factors		Regression		factors	
		CaCO_3 Substrate	CaCO_3 Foliar			CaCO_3 Substrate	CaCO_3 Foliar
		0.7343 ^w	0.5336			0.4946	0.2200
Lineal (L)	0.9470 ^w			Lineal (L)	0.0643		
Cuad. (C)	0.8637			Cuad. (C)	0.9833		
products	0.8960			Products	0.9453		
Model	0.9922	R^2 0.4233 CV 7.92	μ 54.0	Model	0.2580	R^2 0.5447 CV 2.12	μ 34.7
Color L^*	SE ^z	Kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Color L^*	SE	Kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
58.8	2.59	6400.0	7.7	34.7	0.44	6400.0	7.7
58.8	2.60	7009.0	7.4	34.8	0.45	6037.3	8.3
58.8	2.59	7633.6	7.3	34.9	0.44	5685.8	9.0
58.8	2.57	8263.6	7.1	35.0	0.44	5344.9	9.6
58.6	2.55	8896.1	7.0	35.0	0.43	5014.4	10.3
58.5	2.54	9529.7	6.9	35.1	0.42	4693.9	10.9
58.2	2.55	10164.0	6.8	35.2	0.41	4382.9	11.6
57.9	2.62	10799.0	6.7	35.3	0.40	4081.0	12.3

57.5	2.74	11433.0	6.6	35.4	0.40	3787.9	13.0
57.1	2.96	12068.0	6.4	35.5	0.41	3503.2	13.7
56.6	3.26	12704.0	6.4	35.6	0.44	3226.5	14.3

Predicted fixed point	critical values decrypted		Predicted fixed point	critical values decrypted	
58.85	7280.9	7.36	42.24	-288142	-60.88

*Ridge analysis; μ Overall mean, C.V. Coefficient of variation, R^2 Coefficient of determination. ^wprobability of F: $Pr \geq 0.05$ Not significant, $0.05 \leq Pr \leq 0.01$, highly significant $Pr \leq 0.01$ Y Response ($Pr > |t|$) significant linear (L), quadratic (C), significant products of that nutrient with the rest; ^zStandard error

In bell pepper, the brightness in the fruit increased from 34.7 to 35.6 the color L* in 3%, with the decrease in the dose of CaCO_3 from 6400 to 3226.5 Kg ha^{-1} in 50%, and increasing the leaf CaCO_3 from 7.7 up to 14.3 L ha^{-1} in 86%. This indicates that to increase the brilliance in the fruits it is necessary to decrease the CaCO_3 to the soil and increase it foliar.

The response surface for the polar diameter of tomato and bell pepper Table 5, with the CaCO_3 factors to the substrate and foliar, with different levels, presented a general average of 58.0 cm, coefficient of determination R^2 0.1460 and a coefficient of variation of 5.54 for tomato. The bell pepper, presented a general average of 82.5 cm, coefficient of determination R^2 0.4317 and coefficient of variation of 3.76.

The polar diameter in tomato increased from 58.0 to 60.2 cm by 4%, by decreasing the concentration of CaCO_3 to the soil from 6400.0 to 28.6 Kg ha^{-1} by 99.5%, and an increase in foliar CaCO_3 from 7.7 to 8.4 L ha^{-1} in 9% Table 2. For an increase in the polar diameter of the fruit it is necessary to decrease the CaCO_3 to the soil and increase the dose via foliar.

The fruit of the bell pepper increased its polar diameter from 80.6 to 84.9 cm by 5%, with an increase in the dose of CaCO_3 to the soil from 6400.0 to 10635.0 kg ha^{-1} by 66%, while decreasing the foliar from 7.7 up to 1.9 L ha^{-1} in 75%. To achieve a greater polar size in the fruits it is necessary to increase the dose of CaCO_3 to the soil and decrease the concentrations to the foliage.

Table 5. Maximum^x response surface for polar diameter in tomato and bell pepper under greenhouse conditions, treated with calcium carbonate in substrate and leaf application.

Tomato			Bell pepper		
Regression	factors		Regression	factors	
	CaCO_3 Substrate	CaCO_3 Foliar		CaCO_3 Substrate	CaCO_3 Foliar

		0.8721 ^w	0.8678			0.4609	0.5046
Linear (L)	0.8563 ^w			Linear (L)	0.2348		
Cuad. (C)	0.6609			Cuad. (C)	0.5545		
products	0.9912			products	0.5276		
Model	0.9327	R ² 0.1460 CV 5.54	μ 58.0	Model	0.4530	R ² 0.4317 CV 3.76	μ 82.5

Polar diameter cm	SE ^z	Kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Polar diameter cm	SE	Kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
58.0	1.94	6400.0	7.7	80.6	1.88	6400.0	7.7
58.1	1.94	5923.8	8.2	80.9	1.86	6795.0	7.1
58.2	1.90	5235.3	8.3	81.1	1.82	7200.0	6.5
58.3	1.85	4564.9	8.4	81.5	1.77	7613.0	5.9
58.5	1.81	3906.7	8.4	81.8	1.71	8032.5	5.3
58.6	1.77	3254.8	8.4	82.2	1.65	8457.4	4.7
58.9	1.78	2606.5	8.4	82.7	1.59	8886.5	1.2
59.1	1.83	1960.3	8.4	83.2	1.54	9319.4	3.6
59.4	1.96	1315.5	8.4	83.7	1.52	9755.3	3.0
59.8	2.16	671.7	8.4	84.3	1.55	10194.0	2.5
60.2	2.44	28.6	8.4	84.9	1.63	10635.0	1.9

Predicted fixed point	critical values decrypted		Predicted fixed point	critical values decrypted	
58.09	6845.46	9.31	79.94	4256.9	11.59

*Ridge analysis; μ Overall mean, C.V. Coefficient of variation, R² Coefficient of determination. ^wprobability of F: Pr ≥ 0.05 Not significant, Significant 0.05 ≤ Pr ≤ 0.01, highly significant Pr ≤ 0.01 Y Response (Pr > | t |) significant linear (L), quadratic (C), significant products of that nutrient with the rest; ^zStandard error

The response surface for equatorial diameter in tomato and bell pepper under greenhouse Table 6, indicates that the CaCO₃ factors to the substrate and foliar with the different levels, presented an average of 69.0 cm, coefficient of determination R² 0.0635 and a coefficient of variation of 5.20 in the tomato. The bell pepper presented an average of 80.1 cm, coefficient of determination R₂ 0.6795 and a coefficient of variation 2.15.

In tomato, the equatorial diameter increased from 68.9 to 70.3 cm by 2%, decreasing the CaCO₃ to the soil from 6400.0 to 32.4 kg ha⁻¹ by 99.5%, and increasing the dose of foliar CaCO₃ from 7.7 to 8.5 L ha⁻¹ in 10%.

The fruit of the bell pepper increased its polar diameter from 80.6 to 84.9 cm with an increase in the dose of CaCO₃ to the soil from 6400.0 to 10635.0 kilograms per hectare with a foliar concentration of 1.9 kilograms per hectare.

In the bell pepper the equatorial diameter increased from 78.1 to 81.4 cm in 4%, with the increase of CaCO₃ to the ground from 6400.0 to 11690.0 kg ha⁻¹ in 83%, with a decrease in the dose of foliar CaCO₃ from 7.7 to 3.4 L ha⁻¹ in 56%.

Table 6. Maximum^x response surface for equatorial diameter in tomato and bell pepper under greenhouse conditions, treated with calcium carbonate in substrate and leaf application.

Tomato				Bell pepper			
Regression		factors		Regression		factors	
		CaCO ₃ Substrate	CaCO ₃ Foliar			CaCO ₃ Substrate	CaCO ₃ Foliar
		0.9638 ^w	0.9668			0.2147	0.1087
Lineal (L)	0.8764 ^w			Lineal (L)	0.0485		
Cuad. (C)	0.9165			Cuad. (C)	0.1621		
products	0.8701			products	0.5242		
Model	0.9902	R ² 0.0635 CV 5.20	μ 69.0	Model	0.0942	R ² 0.6795 CV 2.15	μ 80.1
Equatorial diameter cm	SE ^z	Kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Equatorial diameter cm	SE	Kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
68.9	2.17	6400.0	7.7	78.1	1.04	6400.0	7.7
69.0	2.18	5968.9	8.2	78.3	1.03	6750.2	7.0
69.0	2.14	8339.2	8.5	78.5	1.01	7125.4	6.4
69.1	2.09	4655.5	8.6	78.8	0.98	7531.7	5.8
69.2	2.03	3975.8	8.7	79.1	0.95	7975.8	5.3
69.4	1.99	3305.5	8.7	79.4	0.91	8465.6	4.7
69.5	1.99	2642.6	8.6	79.7	0.88	9007.9	4.3
69.7	2.05	1985.2	8.6	80.1	0.86	9606.8	3.9
69.9	2.19	1331.6	8.6	80.5	0.86	10260.0	3.6
70.1	2.41	680.9	8.5	80.9	0.89	10959.0	3.5
70.3	2.73	32.4	8.5	81.4	0.97	11690.0	3.4
Predicted fixed point		critical values decrypted		Predicted fixed point		critical values decrypted	
69.04		7107.32	11.67	77.14		3804.4	13.98

^xRidge analysis; μ Overall mean, C.V. Coefficient of variation, R² Coefficient of determination. ^wprobability of F: Pr ≥ 0.05 Not significant, Significant 0.05 ≤ Pr ≤ 0.01, highly significant Pr ≤ 0.01 Y Response (Pr> | t |) significant linear (L), quadratic (C), significant products of that nutrient with the rest; ^zStandard error

4. CONCLUSIONS

In tomato fruit affected more red they were treated with 6269.7 kg ha⁻¹ CaCO₃ to the substrate without foliar spray. Fruit affected higher brightness with 6400.0 kg were

applied to the substrate and 7.7 kg per hectare in foliar spray. To have more elongated fruits and wider is necessary to increase the amount of calcium carbonate in foliar sprays.

In bell pepper, the brightest fruits were achieved with an application of calcium carbonate to the substrate of 226.5 kilograms per hectare and foliar spray 14.3 kilograms per hectare. The most polar diameter was obtained 10,635.0 kilograms per hectare with a concentration in foliar spray of 1.9 kilograms per hectare; The greater equatorial diameter was obtained application to the ground calcium carbonate of 11690.0 kg per hectare and foliar spray concentration of 3.4 kilograms per hectare.

REFERENCES

Carvajal H.J.J.O, I.D. Aristizábal T., C.E. Oliveros T., J.W. Mejía M. 2011. Colorimetría del fruto de café (*Coffea arabica* L.) durante su desarrollo y maduración. Rev. Fac. Nal Agr. Medellín 64:6229- 6240.

Jha, S.N., K. Narsaiah, A.D. Sharma, M. Singh, S. Bansal, R. Kumar. 2010. Quality parameters of mango and potential of non-destructive techniques for their measurement: A review. J. Food Sci. Technol. 47:1-14.

León, K., D. Mery, F. Pedreschi, J. León. 2006. Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. Food Res. Int. 39:1084-1091.

McGuire, R.G. 1992. Reporting of objective color measurements. Hort. Sci. 27:1254-1255.

Pathare, P.B., U.L. Opara, and F.J. Al-Said. 2013. Colour Measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. Food Bioprocess Technol. 6:36-60.

Pérez L.A., C.A. Villaseñor P., V. Crisanto M., J.J.E. Corrales G. 2009. Propiedades mecánicas y maduración de frutos de mango (*Mangifera indica* L.) bajo compresión axial. INAGBI 1:19-23.

CAPÍTULO 11

AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARROZ: MAPEO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO Y SU IMPACTO CON EL RENDIMIENTO DE GRANO

Data de submissão: 06/06/2025

Data de aceite: 27/06/2025

Sergio Salgado Velázquez

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Campo Experimental Huimanguillo
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0002-8443-3190>

Fabiola Olvera Rincón

Colegio de Postgraduados
Campus Tabasco
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0003-2466-3856>

Diana Rubi Ramos López

Universidad Popular de la Chontalpa
Cárdenas, Tabasco, México
<https://orcid.org/0009-0007-9653-3432>

Pablo Ulises Hernández Lara

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Campo Experimental Huimanguillo
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0009-0000-6976-7574>

RESUMEN: El mapeo de las propiedades del suelo es una herramienta importante para encaminarse hacia una agricultura de precisión y mejorar las prácticas agrícolas en función de cada zona de manejo sitio específica para elevar los rendimientos de grano en el cultivo de arroz y optimizar insumos. Para ello, se realizó una malla regular de 30 puntos de muestreo (0-20 cm) para determinar el potencial hidrogeno (pH) y el rendimiento de grano. Se utilizó el enfoque de la estadística clásica para describir el comportamiento de los datos y el análisis geoestadístico para determinar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y el rendimiento de grano usando el método de interpolación de kriging ordinario en un ambiente GIS en R. Los resultados muestran que los modelos esférico, gaussiano y exponencial fueron los que presentaron los mejores ajustes para las variables de estudio. Con el método de interpolación de kriging ordinario fue posible detectar la variabilidad espacial de las propiedades de suelo y el rendimiento de grano, así como la dirección de mayor variabilidad de la propiedad en función de la distancia. Con estos mapas fue posible realizar recomendaciones de manejo agronómico en función de la necesidad de cada zona de manejo específica cómo fue la recomendación de dosis de azufre elemental.

PALABRAS CLAVE: geostatistics; kriging; oryza sativa; management zones; spatial analysis.

PRECISION AGRICULTURE IN RICE: MAPPING SOIL SPATIAL VARIABILITY AND ITS IMPACT ON GRAIN YIELD

ABSTRACT: Soil property mapping is a key tool for advancing precision agriculture and improving farming practices based on specific site management zones, with the aim of increasing rice grain yield and optimizing inputs. A regular grid of 30 sampling points (0–20 cm depth) was established to determine soil pH and grain yield. Classical statistical methods were used to describe data behavior, while geostatistical analysis, through the ordinary kriging interpolation method in an R-based GIS environment, was employed to assess the spatial variability of soil properties and yield. The spherical, Gaussian, and exponential models provided the best fit for the studied variables. Ordinary kriging enabled the detection of spatial variability and the main direction of variation for each property based on distance. These maps allowed for agronomic management recommendations tailored to the needs of each specific zone, such as the recommendation of elemental sulfur dosage.

KEYWORDS: heading; structure; bud; agronomic management.

1. INTRODUCCIÓN

El arroz es considerado uno de los cultivos más importantes en la alimentación de los mexicanos, solo por detrás del maíz, el frijol y el trigo. Entre 2010 y 2020, el consumo per cápita en México aumentó de 9.4 kg a 11 kg, lo que evidencia la creciente necesidad de este grano y su importancia en la dieta de la población (Tello y Corral, 2023). La producción nacional en el año 2023 fue de 36, 877 hectáreas cosechadas, con una producción de 252, 099 toneladas y un rendimiento promedio de 6 t ha⁻¹ (SIAP, 2023). La producción de arroz se está convirtiendo en una prioridad para el gobierno mexicano, el cual está concentrando sus actividades de fomento en transitar hacia una mayor productividad, por medio de programas sociales como “Cosechando soberanía”, “Fertilizantes para el bienestar” y “Precios de garantía” que en coyuntura están aumentando las superficies cultivables de arroz. El plan del gobierno se centra en las siguientes actividades: desarrollo de nuevas variedades genéticas (más productivas y resistentes) a cargo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), tecnificación de las áreas de cultivo, expansión de la infraestructura de riego, incentivos a los trabajadores agrícolas, provisión controlada de pesticidas y fertilizantes, y expansión planificada de la superficie de siembra (Agricultura, 2024). Actualmente, el manejo de la fertilidad se realiza de forma tradicional donde se recomiendan dosis de fertilizantes generalizadas y sin tener en cuenta la variabilidad espacial de los suelos arroceros.

Por otra parte, la agricultura de precisión se fundamenta en la comprensión de la variabilidad espacial de ciertos factores del suelo y su relación con la producción. Este concepto es esencial para desarrollar sistemas de producción más sostenibles

y eficientes (Sánchez-Jiménez *et al.*, 2024; Salgado-Velázquez *et al.*, 2021), ya que la variación espacial de estos factores ejerce una influencia significativa en la productividad de los cultivos (Salgado-García *et al.*, 2021). El conocimiento detallado de las propiedades del suelo es de importancia fundamental para la optimización de prácticas de manejo agrícola. Al mismo tiempo, la distribución espacial de las propiedades fisicoquímicas del suelo se considera un insumo esencial en cualquier planificación agrícola sostenible (Salgado-Velázquez *et al.*, 2020). Por ende, puede contribuir significativamente a ahorrar esfuerzo, tiempo y costos en cualquier proceso de desarrollo de cultivos. Además, la recopilación de datos espaciales precisos y continuos es clave para una toma de decisiones fundamentada. Sin embargo, la disponibilidad de estos datos no solo es limitada, sino también costosa. Por ello, la geoestadística desempeña un papel crucial al representar los análisis del suelo de manera espacial y resaltar las variaciones entre diferentes partes de un área de estudio (Khan *et al.*, 2021). La información científica precisa sobre los suelos es esencial para desarrollar técnicas efectivas de manejo del suelo que sostengan la producción agrícola mientras se mantiene la calidad ambiental. Además, el manejo específico por sitio del potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE); nitrógeno, fósforo y potasio disponibles (Olvera-Rincón *et al.*, 2024) mejora la eficiencia del uso de insumos (Tiruneh *et al.*, 2021), incrementa los rendimientos económicos de los cultivos y reduce los riesgos ecológicos (Khan *et al.*, 2021). Muchos investigadores han utilizado recientemente la geoestadística para estimar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo (Barman *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2022; Wijayanto *et al.*, 2024). Dentro de estas, kriging, regresión kriging y kriging simple son las más utilizadas en modelos de regresión. Un estudio previo comparó dos métodos de kriging, ordinario y de regresión, y concluyó que la regresión kriging fue más precisa para interpolar propiedades del suelo en paisajes contrastantes (Workneh *et al.*, 2024). Según diversos estudios, el kriging ordinario y la interpolación por distancia inversa ponderada (IDW) son técnicas geoestadísticas comúnmente empleadas para estimar propiedades del suelo, debido a su precisión y aplicabilidad en diferentes contextos (Vargas *et al.*, 2023; Flores-del Castillo y Delgado-González, 2025). Para evitar un consumo intensivo de mano de obra durante el muestreo del suelo, es esencial optimizar la densidad y ubicación de las muestras. Por lo tanto, se recomienda altamente el uso de técnicas de interpolación adecuadas (López-Castañeda *et al.*, 2022). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar la variabilidad espacial del potencial hidrogeno (pH) de un suelo Fluvisol y el rendimiento de grano de arroz de temporal en condiciones tropicales de Tabasco, México; con fines de optimizar los insumos aplicados al cultivo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

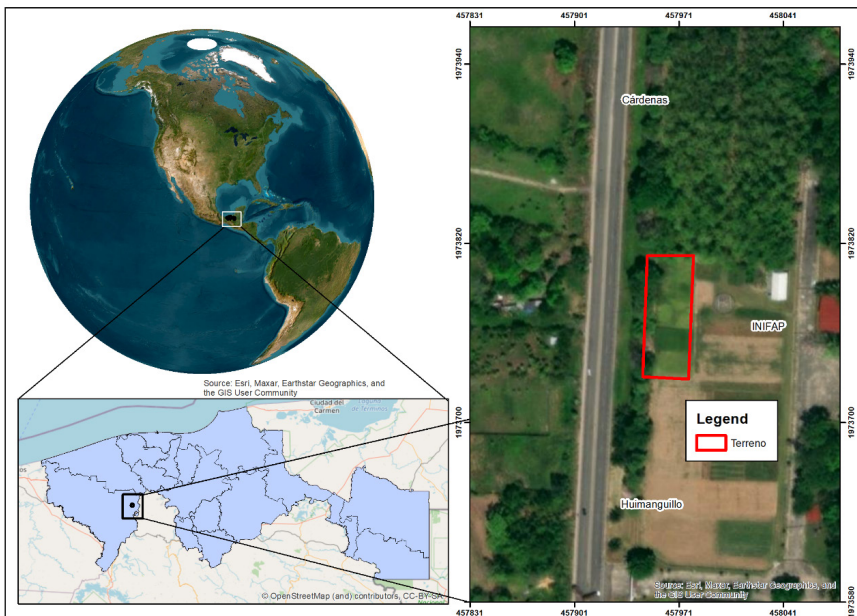
2.1. SITIO DE ESTUDIO: CAMPOS ARROCEROS

El trabajo se llevó a cabo en un suelo Fluvisol eútrico cultivado con arroz desde hace 20 años, ubicado en los campos experimentales del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) del municipio de Huimanguillo, Tabasco (Figura 1). La precipitación promedio anual es de 2356 mm, en los meses de febrero a mayo se presenta una temporada de sequía (276 mm), la temperatura mínima promedio es mayor a 20°C. El ciclo de cultivo fue de temporal y establecido el 15 de junio de 2024 (Salgado-Velázquez *et al.*, 2025).

2.2. SITIOS DE MUESTREO

La superficie del campo experimental es de 2150 m², se trazó una cuadrícula equidistante de 8 m en gabinete sobre la imagen satelital del área de estudio (Salgado-Velázquez *et al.*, 2021) para generar 30 nodos que se tomaron como puntos de muestreos y se delimitó el polígono que corresponden a las parcelas cultivadas con arroz. Esto se elaboró con la ayuda del sistema de información geográfica ArcMap V.9.3. La ubicación de los puntos de muestreo y los polígonos se cargaron al GPS Garmin Map 65.

Figura 1. Ubicación espacial de los campos arroceros en estudio.



2.3. MUESTREO DE SUELOS

Con la función de navegación se ubicaron los puntos de muestreo en campo. En cada punto, con una pala, se limpió la superficie del suelo para evitar impurezas en la toma de muestras. Posteriormente, con una barrena tipo holandesa de acero inoxidable, se colectó la muestra de suelo a una profundidad de 0 a 20 cm, por cada punto se colectaron dos sub-muestras para tener un peso aproximado de suelo de 1.5 kg de muestra (AbdelRahman *et al.*, 2020). Las muestras de suelo se depositaron en una bolsa de nylon previamente identificada. Posteriormente las muestras se trasladaron al laboratorio de análisis de suelo, planta y agua del INIFAP Campus Huimanguillo (Salgado-García *et al.*, 2023).

Figura 2. Muestreo en campo y captura de puntos GPS en el campo de estudio.



2.4. PROCESAMIENTO DE MUESTRAS

Las muestras se extendieron sobre una charola y se desmenuzaron los terrones, para facilitar el proceso de secado, el cual se hizo a la sombra y con aireación. Posteriormente se realizó el tamizado de las muestras a 2 mm en el laboratorio, y se colocó nuevamente en su bolsa para la realización de los análisis de algunas propiedades del suelo.

2.5. VARIABLES DE ESTUDIO

Las variables determinadas en laboratorio fueron: potencial hidrogeno (pH), en agua relación 1:2 (Figura 3); con los métodos descritos en la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT (2001).

Figura 3. Preparación de las muestras y medición de pH con un potenciómetro.



Rendimiento de arroz (RG, kg/ha). Se realizó un muestreo en una grilla irregular de 45 puntos. El muestreo consistió en cosechar el arroz de forma manual, cortando un m^2 de plantas de arroz con el apoyo de una hoz (Figura 4), se depositaron los tallos en una carretilla y posteriormente se desgranaron. Se determinó el rendimiento de grano, pesando con una balanza analítica los gramos de granos obtenidos en el m^2 y se ajustó el peso a una humedad del 14%.

Figura 4. Toma de muestras en un m^2 en cada parcela de estudio para determinar rendimiento de grano.



2.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para todas las variables, se realizó el análisis de la variabilidad de acuerdo con la estadística clásica, y se determinaron las medidas de tendencia central y dispersión. Con estas se calculó el número de muestras que se deben tomar para obtener el valor de cada parámetro, con una desviación (d) con respecto al valor medio, para lo cual se utilizó la Ecuación 1 siguiente:

$$n = \frac{t^2_{\alpha, \infty} S^2}{d^2} \quad (1)$$

Dónde: n es el número de muestras a coleccionar para obtener el valor medio con una probabilidad del 95%; t es la distribución de t de Student; $\alpha = 0.05$; ∞ = infinitos grados de libertad; S = varianza y d = desviación con respecto al valor medio (Ramírez *et al.*, 2022).

Para determinar si los datos seguían una distribución normal se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk con la finalidad de detectarse entre las distribuciones espaciales (Salgado-Velázquez *et al.*, 2021). Los valores atípicos fueron determinados por la gráfica de cajas y bigotes, y estos fueron reemplazados por la media de los vecinos siguiendo la adopción de Jolliffe (2002).

Análisis geoestadístico. Se realizó el análisis con el enfoque de la geoestadística, para lo cual se calcularon los valores de semivarianza experimental para cada variable de estudio con la Ecuación 2.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (2)$$

donde $Z(X_i)$ es el valor de la variable Z en la ubicación muestreada X_i , h es la distancia de desfase en metros y $N(h)$ es el número de pares de puntos de muestra separados por h . En el caso de un muestreo irregular, es raro que la distancia entre los pares de muestra sea exactamente igual a h . Por lo tanto, h suele representarse como un intervalo de distancia. Para el desfase de distancia h , la semivarianza es $\gamma(h)$ (Khan *et al.*, 2021). Se obtuvo un gráfico experimental del semivariograma mediante el cálculo de las semivarianzas a diferentes desfases de distancia. En general, hay tres parámetros importantes que son útiles para caracterizar la dependencia espacial de las variables del suelo en el gráfico del semivariograma: el nugget (C_0), el sill parcial (C) y el rango.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO

Este estudio presenta una evaluación estadística detallada del pH del suelo y el rendimiento de grano de arroz, proporcionando información crucial sobre su variabilidad y distribución. En el Cuadro 1 se presentan los valores de tendencia central y dispersión. Los histogramas de frecuencias, el gráfico de burbujas y, de cajas y bigotes se presentan en la Figuras 5 y 6.

Cuadro 1. Valores de tendencia central y dispersión para el pH del suelo y rendimiento de grano en Huimanguillo, Tabasco.

Propiedad	Valor min.	Valor máx.	Rango	1st. Q	3rd. Q	M	Me	DS	SW
pH	7.41	7.89	0.48	7.69	7.80	7.72	7.76	0.127	0.04
RG (kg/ha)	141	4925	4784	1160.3	2392.2	1923	1888.3	997	0.06

M= Mediana, Me= Media, DS= desviación estándar, SW= Shapiro-Wilk.

El pH presentó la menor variabilidad (1.64%), seguido por el rendimiento de grano (52.85%). Los valores de variabilidad observados son similares a los que señalan Hou *et al.* (2021), con menor variabilidad pH (3.1%) y la EC (19.9%); y con la mayor variabilidad en el rendimiento del cultivo (45%). El pH del suelo se encuentra clasificado como alcalino (7.4 a 7.9) (Ramos *et al.*, 2022). Lo cual puede indicar una deficiencia de ciertos nutrientes esenciales en forma soluble, como potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), y micronutrientes como zinc (Zn), hierro (Fe) y manganeso (Mn). Esto es común en suelos alcalinos, donde el alto pH reduce la solubilidad de estos elementos, limitando su disponibilidad para las plantas. En suelos alcalinos, el hierro (Fe), zinc (Zn), y otros micronutrientes esenciales pueden quedar atrapados en formas químicas insolubles. Esto puede llevar a deficiencias en las plantas, manifestándose como clorosis (amarillamiento de las hojas), reducción del crecimiento y menor productividad (Saleem *et al.*, 2022).

En el caso del pH, el coeficiente de variación <20% se considera adecuado para estudios de campo. Los rangos intercuartílicos (1st Q a 3rd Q) revelan una dispersión moderada para el pH, pero una heterogeneidad considerable rendimiento de grano (Cuadro 1). Los altos coeficientes de variación observados en algunas variables se deben al manejo irregular al que ha estado sometido la parcela experimental en los últimos años.

Figura 5. Medidas de tendencia central y dispersión para el pH del suelo. a) histograma de frecuencias, b) boxplot y c) grafico de burbujas.

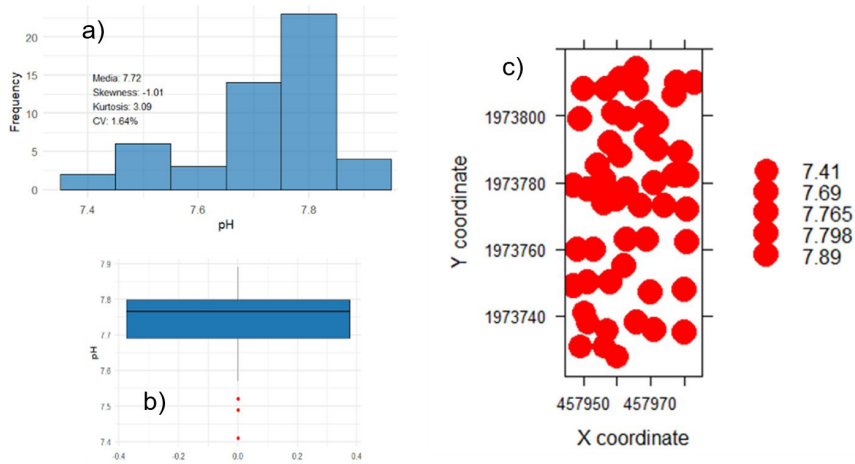
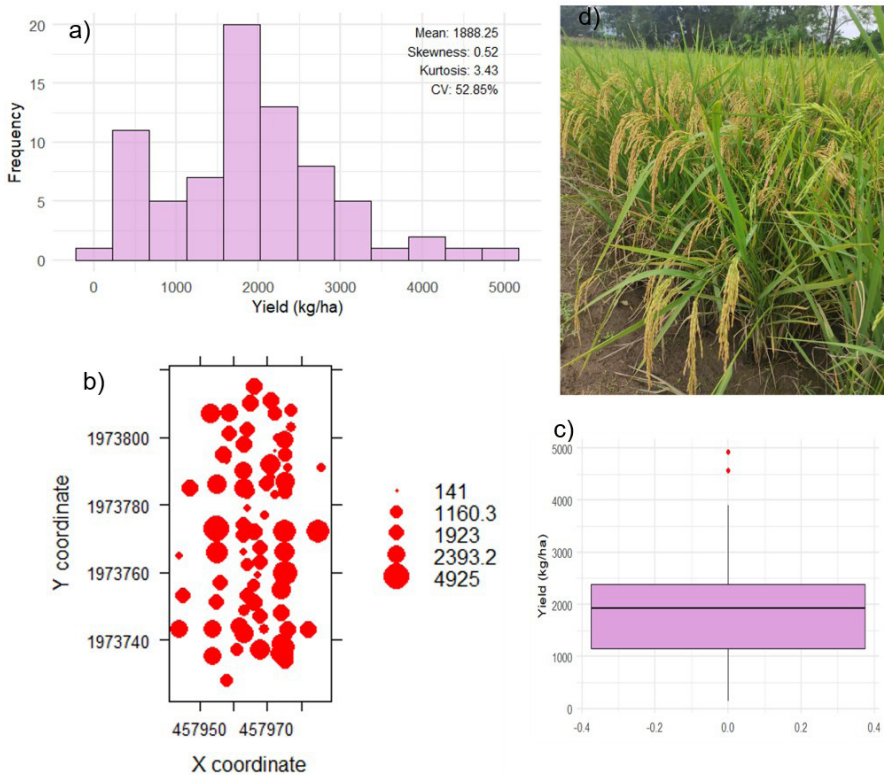


Figura 6. Medidas de tendencia central y dispersión para el rendimiento de grano (kg/ha). a) histograma de frecuencias, b) gráfico de burbujas y c) boxplot y d) arroz en madurez fisiológica.



El pH del suelo presentó una distribución donde las medias y las medianas eran similares, revelando así distribuciones que eran solo ligeramente simétricas a excepción del rendimiento de grano. En todas las propiedades estudiadas la kurtosis fue mayor a 2 mostrando un sesgo hacia la derecha (Figuras 5 y 6). Con respecto al Skewness solamente el rendimiento de grano, se encontraron valores muy cercanos a cero. Esto refleja un claro comportamiento asimétrico de las distribuciones de los datos, razón por la cual se pensaría que las distribuciones no se ajustarían a la normal. Para corroborar lo anterior se realizaron las pruebas de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk (Jangir *et al.*, 2023). De las pruebas solamente el rendimiento de grano se ajustó a una distribución normal (Cuadro 1).

El pH parece mostrar una distribución espacial homogénea según los gráficos de burbujas (Figura 5c). En cambio, el rendimiento de grano muestra una alta heterogeneidad en toda la parcela (Figura 6b), reflejando posibles influencias externas en el rendimiento del cultivo, como la diversidad de variedades establecidas en la parcela y el riego irregular. Estos resultados destacan la necesidad de una gestión específica del suelo para optimizar la producción agrícola, subrayando la interacción entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y los resultados agrícolas (Buladaco *et al.*, 2024).

La gráfica de caja y bigotes, y el análisis de la distribución espacial (Figuras 5b y 6c) mostraron que los valores atípicos detectados fueron la causa principal de los altos valores de asimetría, kurtosis y CV, así como de la no normalidad de estas distribuciones (Zhang *et al.*, 2022). Los valores atípicos fueron reemplazados por la media de los vecinos siguiendo la adopción de Jolliffe (2002), limpiando así los datos para el análisis geoestadístico.

3.2. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DEL PH Y RG (KG/HA)

Las propiedades del suelo del pH y el rendimiento de grano (RG, kg/ha) se sometieron a un análisis de geoestadística y fueron interpolados en una cuadrícula de 0.5 m por kriging ordinario usando la librería gstat de R (Khan *et al.*, 2022). Para todas las propiedades, los variogramas se ajustaron considerando la distribución como isotrópica. Antes del kriging, se seleccionaron los variogramas mejor ajustados basándose en el error cuadrático medio (RMSE) y los criterios de Akaike (AIC) usando VESPER 1.6 (Salgado-Velázquez *et al.*, 2025). Además, se calculó el Índice de Dependencia Espacial (SDI), que es la relación entre la varianza del efecto nugget y el sill (Uribe-Opazo *et al.*, 2023) para cada variograma y expresado como porcentaje (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características de los variogramas y errores de predicción de los modelos con mejor ajuste para las variables de estudio.

Variable	Model	Nugget (Co)	Partial Sill (C)	Sill (Co+C)	Range	SDI (%)	RMSE	AIC
pH	Sph	0.002703	0.02211	0.024813	39.2	10.9	0.0034	-131.8
RG (kg/ha)	Exp	150000	1100000	1250000	35	12.0	0.993	-457.5

*Raíz del error cuadrático medio (RMSE) y criterios de Akaike (AIC). SDI= $[Co / (Co + C)] \times 100$.

Se reporta que el pH no presentó efecto de nugget según los modelos ajustados (Cuadro 2). El nugget del rendimiento de grano (RG) puede atribuirse tanto a errores inherentes de medición como a variaciones a distancias menores que el intervalo de muestreo (AbdelRahman *et al.*, 2020). Los valores observados de sill, que es el valor del semivariograma en el cual el modelo se vuelve plano, fueron relativamente pequeños, a excepción del rendimiento. Para el rendimiento de grano fue necesario hacer una transformación por el método de Box Cox para correr el kriging (Khan *et al.*, 2021). La distancia máxima a la cual una variable deja de mostrar dependencia espacial se denomina rango. Los valores de rango para todas las variables de estudio fueron entre 35 y 39 m. Un valor bajo de rango indica que las propiedades del suelo están principalmente influenciadas por los valores de sus vecinos inmediatos y menos influenciadas por los valores a distancias mayores (Trevisan *et al.*, 2021). Por otro lado, se determinó el índice de dependencia espacial (SDI) encontrándose que el rendimiento de grano y el pH presentaron con una alta dependencia espacial (<25%).

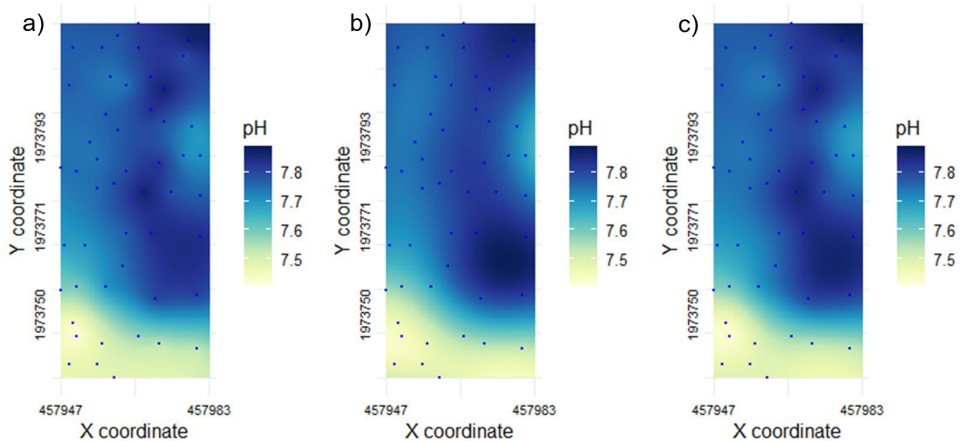
3.3. INTERPOLACIÓN KRIGING ORDINARIO

La distribución de la variabilidad de las propiedades del suelo de pH y el rendimiento de grano, se discuten a continuación para cada variable de estudio.

3.3.1. Potencial hidrógeno del suelo (pH)

La distribución espacial del pH se visualiza en la Figura 8. El modelo que mejor describió la variabilidad espacial del pH fue el Esférico. Los parámetros del semivariograma se consideran aceptables y esto se corrobora con una validación cruzada cuyos errores de predicción son pequeños (Cuadro 2).

Figura 7. Mapas generados por el método de interpolación kriging para pH ajustados con los modelos exponencial (a), gaussiano (b) y esférico (c).

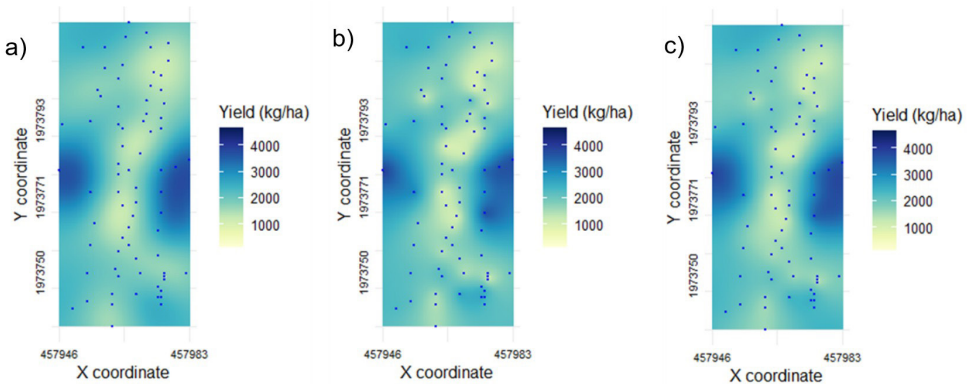


El pH del suelo es una de las propiedades más importantes, ya que controla en gran medida la disponibilidad de nutrientes. Este parámetro indica la actividad de los iones de hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-) en la solución del suelo (Yadav *et al.*, 2022). De acuerdo con la Figura 7 y Cuadro 1, el pH osciló de 7.4 a 7.9, considerados como un suelo alcalino, y con un patrón espacial de valores bajos en la parte sur- suroeste-sureste; y los más altos hacia el norte. El uso de agua de riego con alto contenido de bicarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}) como las de Tabasco (Jerez-Ramírez *et al.*, 2023) puede contribuir al aumento del pH del suelo, especialmente en suelos con baja capacidad tampón. Este tipo de agua, al interactuar con el suelo, puede provocar la precipitación de carbonato de calcio ($CaCO_3$) y la acumulación de sodio intercambiable, reduciendo la disponibilidad de ciertos micronutrientes esenciales como el hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn). Esto genera condiciones desfavorables para el desarrollo óptimo de las plantas, manifestándose como clorosis debido a la deficiencia de Fe o Zn, micronutrientes cuya solubilidad disminuye en pH elevados (Guo *et al.*, 2024). Asimismo, en suelos alcalino, el fósforo tiende a formar compuestos insolubles con calcio, hierro y aluminio, lo que lo hace menos disponible para las plantas. Este proceso se conoce como fijación de fósforo, en el cual el fósforo se inmoviliza y se vuelve menos accesible para la absorción de las plantas (Omar *et al.*, 2024). Por lo anterior, es recomendable aplicar enmiendas como azufre elemental o yeso agrícola para reducir el pH y mejorar la solubilidad de los nutrientes. Se recomienda aplicar 350 kg/ha de azufre agrícola para la clase de pH <7.5 y 705 kg/ha para la clase >7.5 kg/ha, preferentemente durante la siembra y en la primera fertilización (Saleem *et al.*, 2022).

3.3.2. Rendimiento de grano de arroz (RG, kg/ha)

La distribución espacial del rendimiento de grano de arroz (kg/ha) se muestra en la Figura 8. El modelo que mejor describió la variabilidad espacial del rendimiento de grano fue el Exponencial. Los parámetros del semivariograma se consideran aceptables y esto se corrobora con una validación cruzada cuyos errores de predicción son pequeños (Cuadro 2).

Figura 8. Mapas generados por el método de interpolación kriging para rendimiento de grano (kg/ha) ajustados con los modelos exponencial (a), gaussiano (b) y esférico (c).



Con la Figura 8, se logra deducir que existe una relación espacial con el pH (Figuras 7 y 8), es decir, que la parte norte de la parcela presento los valores más bajos para el rendimiento de grano y es donde se obtienen los valores más altos para pH, generados por la interpolación de kriging ordinario. Todos los modelos coincidieron con las mismas tendencias espaciales del rendimiento de grano. Los valores de rendimiento de grano obtenidos en el intervalo de 0.1 a 4.9 ton/ha se consideran bajos si se comparan con la media nacional de 6.8 ton/ha (SIAP, 2023). Como se ha discutido, el pH elevado, son las principales limitantes en la producción del grano de arroz. En este sentido, las fuentes usadas de fertilizantes no son las óptimas para estas condiciones y es necesario utilizar las recomendaciones generadas en base a los mapas de interpolación de kriging.

4. CONCLUSIÓN

La integración de análisis estadístico con visualización espacial es una herramienta poderosa para identificar variabilidad crítica en propiedades del suelo que pueden impactar la producción agrícola. Este enfoque permite una toma de decisiones informada para optimizar el manejo de cultivos y garantizar un uso eficiente de los recursos. Con el método de interpolación de kriging ordinario fue posible detectar

la variabilidad espacial de las propiedades de suelo y el rendimiento de grano en los diferentes sitios de la parcela, así como la dirección de mayor variabilidad de la propiedad en función de la distancia. Con estos mapas fue posible realizar recomendaciones de manejo agronómico en función de la necesidad de cada zona de manejo específica cómo fue la recomendación de dosis de azufre elemental.

LITERATURA CITADA

AbdelRahman, M. A., Zakarya, Y. M., Metwaly, M. M., and Koubouris, G. 2020. Deciphering soil spatial variability through geostatistics and interpolation techniques. *Sustainability* 13(1): 194. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010194>

Agricultura. 2024. Mecánica operativa para el otorgamiento de incentivos para grano y semilla certificada de arroz palay (grueso y delgado). <https://www.gob.mx/segalmex/documentos/mecanica-operativa-para-el-otorgamiento-de-incentivos-para-grano-y-semilla-certificada-de-arroz-palay-grueso-y-delgado?idiom=es>

Barman, A., Sheoran, P., Yadav, R. K., Abhishek, R., Sharma, R., Prajapat, K., and Kumar, S. 2021. Soil spatial variability characterization: Delineating index-based management zones in salt-affected agroecosystem of India. *Journal of Environmental Management*, 296: 113243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113243>

Buladaco II, M. S., Tandugon, H. M. F., Bunquin, M. A. B., Sanchez, P. B., Bugia, S. A. C., Yales, N. A. P., and Casacop, S. M. 2024. Mapping and Assessment of Within-Field Spatial Variability of Soil pH, Electrical Conductivity, and Particle Size Distribution to Delineate Management Zones. *Ecological Engineering & Environmental Technology (EET)* 25(10). DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/191244>

Flores-del Castillo, E. Y., & Delgado-González, O. (2025). Muestreo de fertilidad de suelo e interpolación mediante Kriging ordinario para mapeo temático. *Ingeniería Agrícola*, 15, cu-id.

Guo, B. X., Zhou, J., Zhan, L. Q., Wang, Z. Y., Wu, W., and Liu, H. B. 2024. Spatial and temporal variability of soil pH, organic matter and available nutrients (N, P and K) in Southwestern China. *Agronomy* 14(8): 1796. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14081796>

Han, Y., Yi, D., Ye, Y., Guo, X., and Liu, S. 2022. Response of spatiotemporal variability in soil pH and associated influencing factors to land use change in a red soil hilly region in southern China. *Catena* 212: 106074. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106074>

Hou, L., Liu, Z., Zhao, J., Ma, P., and Xu, X. 2021. Comprehensive assessment of fertilization, spatial variability of soil chemical properties, and relationships among nutrients, apple yield and orchard age: A case study in Luochuan County, China. *Ecological indicators* 122: 107285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107285>

Jangir, C. K., Sangwan, P. S., Panghaal, D., Kumar, S., Meena, R. S., Bharti, ... & Singh, N. 2024. Spatial variability and statistical analysis of soil properties in the rice wheat-based systems of North-West India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 55(8): 1205-1223. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2296989>

Jerez-Ramírez, N. A., Arriaga-Weiss, S. L., Ruiz-Campos, G., Gama-Campillo, L. M., Salcedo-Mesa, M. Á., Villanueva-García, C., ... & Valdez-Leal, J. D. D. 2023. Composition and spatiotemporal diversity of the aquatic bird community in Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Ciencias marinas* 49.

Jolliffe, I. T. 2002. Principal Component Analysis, 2nd ed. Springer-Verlag, New York, NY.

Khan, M. Z., Islam, M. R., Salam, A. B. A., and Ray, T. 2021. Spatial variability and geostatistical analysis of soil properties in the diversified cropping regions of Bangladesh using geographic information system techniques. *Applied and Environmental Soil Science* 2021(1): 6639180. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6639180>

López-Castañeda, A., Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Rincón-Ramírez, J. A., and Bautista, F. 2022. Digital mapping of soil profile properties for precision agriculture in developing countries. *Agronomy* 12(2): 353. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020353>

Olvera-Rincón, F., Salgado-Velázquez, S., Córdova-Sánchez, S., Palma-López, D. J., López-Castañeda, A., and Castañeda-Ceja, R. 2024. Defoliación del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en la Chontalpa, Tabasco, México. *Agronomía Mesoamericana*, 35(1). DOI: <https://doi.org/10.15517/am.2024.53608>

Omar, M. D. M., Massawe, B. H., Shitindi, M. J., Pedersen, O., Meliyo, J. L., and Fue, K. G. 2024. Assessment of salt-affected soil in selected rice irrigation schemes in Tanzania: understanding salt types for optimizing management approaches. *Frontiers in Soil Science* 4:1372838. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1372838>

Ramírez, A. F. V., Ramírez, I. M., and Arroyave, A. F. 2022. Relación entre el pH y las mediciones de conductividad eléctrica en un suelo cultivable ubicado en Medellín, Colombia. *Ingenierías USBMed* 13(2): 56-62.

Ramos, P. C. M., Estrada-Andrade, L. F., Alor-Chávez, M. D. J., Méndez-Olán, C., and Morales-Bautista, C. M. 2022. Condiciones de fertilidad de un suelo en Comalcalco, Tabasco, México. *Journal of Basic Sciences* 8(23): 85-95.

Saleem, A., Zulfiqar, A., Ali, B., Naseeb, M. A., Almasaudi, A. S., and Harakeh, S. 2022. Iron sulfate (FeSO₄) improved physiological attributes and antioxidant capacity by reducing oxidative stress of *Oryza sativa* L. cultivars in alkaline soil. *Sustainability* 14(24): 16845. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416845>

Saleem, A., Zulfiqar, A., Ali, B., Naseeb, M. A., Almasaudi, A. S., and Harakeh, S. 2022. Iron sulfate (FeSO₄) improved physiological attributes and antioxidant capacity by reducing oxidative stress of *Oryza sativa* L. cultivars in alkaline soil. *Sustainability* 14(24): 16845. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416845>

Salgado-García, S., Palma-López, D. J., Zavala-Cruz, J., Lagunes-Espinoza, L. D. C., Córdova-Sánchez, S., Castelán-Estrada, M., and Salgado-Velázquez, S. 2023. Fertilización y nutrición sustentable de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en Tabasco, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3082>

Salgado-García, S., Salgado-Velázquez, S., Palma-López, D. J., Zavala-Cruz, J., Córdova-Sánchez, S., Rincón-Ramírez, J. A., and Hernández-Nataren, E. 2021. Soil fertility classification for sugarcane in supply areas of a sugar mill. *Agro Productividad*: 14(10). DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i10.1703>

Salgado-Velázquez, S., Acopa Colorado, J., Salgado García, S., Córdova Sánchez, S., Palma López, D., Rincón Ramírez, J. A., and López Castañeda, A. 2021. Spatial variability of some chemical properties of a Cambisol soil with cocoa (*Theobroma cacao* L.) cultivation. *Agro Productividad* 14(1): 43-49. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i1.1706>

Salgado-Velázquez, S., Olvera-Rincón, F., Ramos-López, D. R., Hernández-Lara, P. U., Inurreta-Aguirre,

H. D., & Palma-Cancino, D. J. (2025). EcoCrop model approach for agroclimatic suitability of rice (*Oryza sativa* L.) cultivation. *Agro Productividad*.

Salgado-Velázquez, S., Salgado-García, S., Rincón-Ramírez, J. A., Rodríguez Jr, F. A., Palma-López, D. J., Córdova-Sánchez, S., and López-Castañeda, A. 2020. Spatial variability of soil physicochemical properties in agricultural fields cultivated with sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in Southeastern Mexico. *Sugar Tech* 22(1): 65-75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00742-9>

Sánchez-Jiménez, M., Espinoza, L. D. C. L., López, D. J. P., Sánchez, S. C., Pech, R. G. A., and Salgado-Velázquez, S. 2024. Producción de biomasa e índices fisiológicos de cultivares de caña de azúcar en diferentes subunidades de suelos. *Acta Agrícola y Pecuaria* 10(1):6. DOI: <https://doi.org/10.30973/aap/2024.10.0101007>

SIAP. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Datos de producción agrícola nacional 2023. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

Tello, A. F., and Corral, M. A. H. 2023. Competitividad internacional del arroz mexicano: un análisis con base en datos de comercio exterior. *RECAI Revista de Estudios en Contaduría, Administración e Infomática* 12(35): 18-31.

Tiruneh, G. A., Alemayehu, T. Y., Meshesha, D. T., Vogelmann, E. S., Reichert, J. M., and Haregeweyn, N. 2021. Spatial variability of soil chemical properties under different land-uses in Northwest Ethiopia. *Plos one*, 16(6): e0253156.

Trevisan, R. G., Bullock, D. S., and Martin, N. F. 2021. Spatial variability of crop responses to agronomic inputs in on-farm precision experimentation. *Precision Agriculture* 22: 342-363. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09720-8>

Uribe-Opazo, M. A., Dalposso, G. H., Galea, M., Johann, J. A., De Bastiani, F., Cambillo Moyano, E. N., and Grzegozewski, D. M. 2023. Spatial variability of wheat yield using the gaussian spatial linear model. *Australian Journal of Crop Science* 17(2): 179-189.

Vargas Diaz, R. E., Galindo Pacheco, J. R., Giraldo Henao, R., Varón Ramírez, V. M., Wilches Ortiz, W. A., & Franco Florez, C. V. 2023. Metodologías de interpolación y predicción espacial para el análisis de las propiedades físicas del suelo en la hoya del río Suárez (Colombia). *Siembra*, 10(1).

Wijayanto, Y., Nareswari, N. R., Saputra, T. W., and Purnamasari, I. 2024. Characterizing, Predicting, and Mapping Soil Available Phosphor, pH, and Electrical Conductivity in Rubber Plantation Based on Three Different Methods of Ordinary Kriging in GIS Environment. *International Journal on Advanced Science, Engineering & Information Technology* 14(2). DOI: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.2.19079>

Workneh, H. T., Chen, X., Ma, Y., Bayable, E., and Dash, A. 2024. Comparison of IDW, Kriging and orographic based linear interpolations of rainfall in six rainfall regimes of Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 52: 101696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101696>

Zhang, X., Xiang, D. Q., Yang, C., Wu, W., and Liu, H. B. 2022. The spatial variability of temporal changes in soil pH affected by topography and fertilization. *Catena* 218: 106586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106586>

CAPÍTULO 12

LA ENSEÑANZA AGRÍCOLA Y LA FORMACIÓN DEL INGENIERO AGRÓNOMO Y SU IMPORTACIÓN EN LA AGRICULTURA: PASADO, PRESENTE Y FUTURO

Data de submissão: 09/07/2025

Data de aceite: 25/07/2025

José Luis Gutiérrez Liñán

Doctor en Educación

Profesor de Tiempo Completo

Centro Universitario UAEM

Zumpango, México

<https://orcid.org/0000-0003-3589-2750>

Carmen Aurora Niembro Gaona

Doctora en Educación

Profesora de Tiempo Completo

Centro Universitario UAEM

Zumpango, México

<https://orcid.org/0009-0008-2582-7692>

Alfredo Medina García

Maestro en Educación

Profesor de Tiempo Completo

Facultad de Ciencias Agrícolas UAEMéx

Oscar Arce Cervantes

Doctor en Biotecnología

Profeso de Tiempo Completo

Instituto de Ciencias

Agropecuarias de la UAEH

<https://orcid.org/0000-0002-3388-2973>

RESUMEN: La educación agrícola desde su origen su fortalecer a la agronomía como el estudio científico de la agricultura y conceptualizarse como el conjunto de ciencias que estudian y establecen la teoría y su aplicación con la finalidad de detectar, precisar y solucionar aquellos problemas técnico, ecológicos y socioeconómicos de la producción vegetal y animal, por lo anterior surge el ingeniero agrónomo como un profesionista que posee la sensibilidad necesaria para integrar la problemática del campo (limitaciones y potencialidades); ya que cuenta con los conocimientos técnicos y científicos para transformar positivamente los sistemas de producción actuales, pues comprende y aplica el método científico, difunde en el campo los cambios tecnológicos y asesora a los productores en los problemas que afrontan, constituyendo así un eje promotor del cambio en el medio rural. Por lo que las Instituciones de Educación Agrícola Superior están en constante actualización de sus programas educativos, con la intención de que su egresado de cumplimiento a las necesidades del campo laboral y a la sociedad.

PALABRAS CLAVE: educación agrícola; agronomía; rol del ingeniero agrónomo; desarrollo rural; aplicación del método científico.

THE ROLE OF AGRICULTURAL EDUCATION IN SHAPING AGRICULTURAL ENGINEERS AND ITS IMPACT ON AGRICULTURE: PAST, PRESENT, AND FUTURE

ABSTRACT: Agricultural education has historically contributed to strengthening agronomy as the scientific study of agriculture. It is conceptualized as the body of sciences that study and establish both theoretical foundations and practical applications aimed at identifying, defining, and solving technical, ecological, and socioeconomic problems in plant and animal production. Within this framework, the agricultural engineer emerges as a professional equipped with the sensitivity to understand the complexities of rural areas – both their limitations and potential. This professional possesses the technical and scientific knowledge to positively transform current production systems, understands and applies the scientific method, disseminates technological innovations in the field, and provides guidance to producers in facing agricultural challenges, thereby becoming a driving force for change in rural environments. Consequently, institutions of higher agricultural education are continuously updating their academic programs to ensure that graduates meet the needs of the job market and contribute effectively to society.

KEYWORDS: agricultural education; agronomy; agricultural engineering; rural development; scientific method.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura se concibe como un proceso económico, que comprende la intervención del hombre en el ecosistema con la finalidad de obtener productos de naturaleza vegetal y animal. Está determinada históricamente y socialmente al desarrollo de las culturas porque se caracteriza por la fuerza de trabajo, conocimiento y habilidades del hombre, a través de los medios e instrumentos que le permite el aprovechamiento y la transformación de su medio, con la finalidad de satisfacer sus grandes necesidades. Debido a que la agricultura es una forma de vida muy arraigada en nuestro país, como tal hay que, entenderla como un producto cultural, así surgió la agronomía como estudio científico de la agricultura y que puede conceptualizarse como el conjunto de ciencias que estudian y establecen la teoría y su aplicación con la finalidad de detectar, precisar y solucionar aquellos problemas técnico, ecológicos y socioeconómicos de la producción vegetal y animal. Por lo que la agronomía tiene una gran responsabilidad que va desde el individuo que la práctica hasta la una sociedad que demanda productos de una buena calidad.

Con el gran compromiso que tiene esta área del conocimiento hacia la sociedad, surge la figura del Ingeniero agrónomo, como un profesionalista que posee la sensibilidad necesaria para integrar la problemática del campo (limitaciones y potencialidades); ya que cuenta con los conocimientos técnicos y científicos para transformar positivamente los sistemas de producción actuales, pues comprende y aplica el método científico, difunde

en el campo los cambios tecnológicos y asesora a los productores en los problemas que afrontan, constituyendo así un eje promotor del cambio en el medio rural. Además, cuenta con la capacidad para identificar, acceder y manejar fuentes de información, así como formular problemas, desarrollar y presentar propuestas de solución.

Cerón y Rosero en el 2017 definen al Ingeniero Agrónomo de acuerdo como el profesional capacitado para realizar diversas labores dentro de su campo profesional, no solo labores que lo remitan como técnico, ni tampoco actividades que lo definan específicamente como promotor de ventas o investigador; su perfil va mucho más allá de eso, él es un profesional capaz de generar un cambio, innovando y proponiendo constantemente, cambiando parámetros y a su vez mentes y llevando al sector agrícola y pecuario a una nueva era de emprendimiento y motivación para un nuevo sector rural más productivo y sobresaliente.

Para el colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Aragón, Navarra y País Vasco, el Ingeniero Agrónomo, es un profesional capacitado para proyectar, planificar, organizar, dirigir y controlar los sistemas y procesos productivos desarrollados en el sector agrario y alimentario.

Durante muchos años el Ingeniero Agrónomo ha contado con un perfil profesional dirigido única y exclusivamente a la explotación de los predios rurales, con el fin de conseguir grandes cultivos verdes sin rastro de plagas y enfermedades y además sean capaces de abastecer la demanda mundial de alimentos. Poco a poco este perfil tan cerrado del profesional del agro ha venido cambiando incorporándosele nuevas alternativas de producción que involucran otros aspectos mucho más sociales que tienen en cuenta el bienestar del productor.

El presente trabajo presente realizar una revisión bibliográfica sobre la importancia del Ingeniero Agrónomo en la agricultura, basándonos en el pasado, presente y futuro.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En México la agronomía surge de un proyecto educativo; no de un proyecto profesional. Cleaves en 1985, señala que algunas profesiones mexicanas como la medicina y la ingeniería civil, dispusieron, en su origen, de un proyecto profesional. La agronomía, no así, la de la agronomía mexicana postrevolucionaria es la historia del trance entre una profesión originada en una propuesta educativa, y los diversos proyectos estatales para el campo.

La enseñanza agrícola en México se inició en 1832, distinguiéndose en ese momento varios niveles de estudios como lo eran la educación elemental, nivel medio o

sub-profesional (práctico), y nivel superior (Reyes, 1981). Además, se establecieron otras cátedras como la botánica, la agricultura práctica y química aplicada a las artes. En 1833 se funda de manera oficial la Escuela Nacional de Agricultura en el Colegio de San Gregorio bajo el control de los jesuitas (García, 2003). Sus egresados tenían que desempeñarse como mayordomos, con la intención de ser los responsables de las Haciendas.

En 1838 la situación política del país, influyo de una manera determinante en el estudio de la agricultura, y la enseñanza agrícola fue suprimida antes de iniciar sus labores, mientras en los Estados Unidos ya se había planteado la obligación de fomentar la modernización de la agricultura y había procedido a formar estadísticas agrícolas poniéndolas a cargo de la Oficina de Patentes (Contreras y Galindo 2021).

El 2 de octubre de 1843 se publica un decreto siendo Presidente de la República D. Antonio López de Santana, en el que ordena a la Dirección General de Industrias que se estableciera una Escuela de Agricultura y otra de Artes en las cercanías de México.

En 1850 se crea un sistema de escuelas de agronomía por parte del gobierno federal, en donde se enseñaban los usos de la química en el mejoramiento de suelos y en la nutrición vegetal; al igual que se autorizó la utilización de terrenos federales para la experimentación e investigación agrícolas, etc.

Durante el periodo de 1854 a 1876, se lleva a cabo muchos acontecimientos en pro de la enseñanza agrícola en México, entre los que encontramos el surge la Escuela de Agricultura y Veterinaria, se logra mantener en el colegio de San Gregorio a cuatro alumnos dedicados a los estudios agronómicos. Para 1854, otorga de modo formal el edificio de San Jacinto para la escuela; de inmediato se iniciaron las cátedras y, para fines del siguiente año, se terminó un curso de química agrícola. Éste se siguió impartiendo gracias a la actividad de Leopoldo Río de la Loza (primer director del plantel), mientras las clases de agricultura sufrieron retrasos por falta de personal capacitado. En 1857, la remodelación del edificio estaba avanzada y se dotó a la escuela de máquinas, instrumentos utensilios y aparatos para la actividad práctica (Pérez, 2010). A pesar de los vaivenes políticos del siglo XIX, la escuela de San Jacinto se constituyó en la institución más antigua en la enseñanza agrícola de México y de Latinoamérica (Reyes, 1981).

En 1870, se comenzó con una serie de innovaciones técnicas en el cultivo y aprovechamiento del henequén, que se generalizaron en la siguiente década. Estas novedades incluían rieles “decauville”, elevadores, tren de raspa, máquina desfibradora, y el transporte del cordel en ferrocarril al puerto de Progreso, desde donde se exportaba. El cultivo del agave era cuidadosamente vigilado en los plantíos, para que las plantas tuvieran un crecimiento uniforme, debido a que tardan varios años en madurar (Zuleta, 1999).

Para 1879 se crea la Sociedad Agrícola Mexicana, cuyos objetivos eran: a) Promover el desarrollo y engrandecimiento de la agricultura, y la consiguiente mejora de las condiciones de las clases trabajadoras. b) defender los derechos e intereses de la agricultura. c) divulgar todas las noticias, descubrimientos y aplicaciones de la industria favorables a la agricultura y que puedan ser aplicables en nuestro país (Cervantes y Saldaña. 2010).

Al llegar Porfirio Díaz a la presidencia por segunda ocasión (1884-1911), se puso el énfasis en la enseñanza agrícola, misma que recibió un gran impulso: se crearon las escuelas primarias y secundarias agrícolas, las escuelas regionales de agricultura a nivel profesional y las estaciones experimentales. El gobierno de Díaz, se encaminó a mejorar la educación y principalmente la agrícola; la enseñanza profesional dependía casi exclusivamente de los gobiernos federal y estatal (Contreras y Galindo, 2021).

Durante el gobierno del General Porfirio Díaz de 1876 a 1910, la Escuela Nacional de Agricultura (ENA) surgió como un proyecto educativo que consideraba la agricultura como uno de los pilares para el desarrollo de la economía nacional, la cual debería basarse en el uso de la tecnología. De este modo, la ENA sufrió cambios internos relacionados al perfil que necesitaban sus egresados. A su vez, se realizaron reformas a los planes de estudio, de lo que sus principales resultados fue la consolidación de un nuevo campo científico en el país: el de la “Agronomía”, lo cual influyó en la aparición de varios títulos académicos como los de: “Profesor de Agricultura” y de “Agricultor Teórico Práctico”, para dar lugar al de Agrónomo (1879), Ingeniero Agrónomo (1883 y 1893) e Ingeniero Agrónomo e Hidráulico (1908) de acuerdo con el trabajo Urbán 2005, citado por Contreras y Galindo en 2021.

De 1921 a 1945 es la época post-revolucionaria que permitió generar un primer proyecto profesional, gracias a la reivindicación de preceptos revolucionarios y nacionalistas del artículo 3° y del Artículo 27 constitucionales (Cleaves, 1988), lo que le confirió a la profesión un conjunto de aspiraciones éticas y políticas importantes (Arce, et al, 1982). Los agrónomos colaboraron muy de cerca en la reforma agraria a través de la creación de ejidos y repartos de tierra, así como la organización de los campesinos. Se impulsó la educación agrícola a todos los niveles. En 1921. Se creó la tercera escuela de agronomía en el país: la Escuela Superior de Agricultura “Antonio Narro”. En 1925 se formaron las Escuelas Centrales Agrícolas, cuyo propósito la capacitación para el trabajo. También se formaron las Escuelas Normales Rurales. La investigación agrícola institucionalizada empezó a realizarse por los años 1930-1931, en la estación experimental “El Yaqui, en el estado de Sonora.

Gómez y Pérez en 1980, mencionan que, en 1936 en periodo de Lázaro Cárdenas, la enseñanza agrícola giraba alrededor de la fitotecnia, la veterinaria, la mecánica agrícola y la irrigación. Durante el cardenismo, el ejido como prioridad y el campesinismo como ideal.

A finales de los años 1940, arrancó en México un convenio firmado por la Secretaría de Agricultura y Ganadería y la Fundación Rockefeller que tenía como objetivos:

- 1.- Crear el desarrollo tecnológico que permitiera incrementar la productividad de los cultivos básicos de México, particularmente maíz, trigo, frijol y sorgo, de reciente introducción.
- 2.- Formar a técnicos agrícolas mexicanos en las ciencias agropecuarias con nivel de posgrado que garantizaran el sostenimiento del primer objetivo. A la postre el desarrollo del convenio beneficiaría a México a través del desarrollo articulado de un sistema de investigación propio y acorde con las necesidades del campo mexicano con tres institutos nacionales de investigación: el agrícola (INIA), el pecuario (INIP) y el forestal (INIF). (Mena y Ramírez, 2014).

En el periodo de 1946 a 1964 se considera el milagro mexicano, donde México entra en una nueva etapa de su desarrollo agrícola que habrá de implicar el inicio, la incubación y el establecimiento de la “Revolución verde”, desarrollada por investigadores estadounidenses en suelo mexicano, dirigidos por el doctor Norman Borlaug, en trigo, y el doctor Edwin Welhausen, en maíz, y quienes habrá de sorprender al mundo entero por el logro de resultados productivos agrícolas espectaculares, basados en el desarrollo de semillas de variedades mejoradas por la aplicación de la genética y el uso óptimo de maquinaria agrícola e insumos productivos como fertilizantes químicos y pesticidas (Mena y Ramírez, 2014), con el objetivo era aumentar la producción agrícola.

Los servicios de extensión son tal vez la razón de ser del ingeniero agrónomo como profesional, el extensionismo como actividad medular del ejercicio profesional de la agronomía lleva implícita una labor de asistencia técnica a través de la difusión de conocimientos y habilidades generados en instituciones educativas o de investigación y que pueden ayudar a los productores agropecuarios a mejorar sus capacidades productivas y condiciones de vida. Esos conocimientos pueden ser transmitidos de manera organizada a través de contactos personales, cursos, prácticas y demostraciones diseñadas y ejecutadas de manera teórico-práctica.

La extensión agrícola inicia en México en el año de 1911, con un grupo de instructores prácticos en agricultura; sin embargo, el proceso se vio interrumpido durante años, debido a la Revolución. Para 1922 se reactiva el servicio de extensión a través de la “Oficina de Agrónomos Regionales”, que contaba con 22 agrónomos. En 1936 se transformó en la

“Oficina de Fomento Agrícola” y cuenta ya con 40 ingenieros agrónomos. Para 1948 se reorganiza y toma el nombre de “Extensión Agrícola” y aumenta su personal técnico a 48 profesionales de la agronomía. Para el año 1969 el Sistema Nacional de Extensión Agrícola (SNEA) contaba en funciones a 400 ingenieros agrónomos distribuidos en todo el país y tan sólo dos años después, en 1971 el SNEA se transformó en la Dirección General de Extensión Agrícola e incrementó a 1,772 participantes el número de profesionistas participantes (Reyes, 1981).

En 1943, en el marco del convenio entre la Fundación Rockefeller (EE.UU.) y la Secretaría de Agricultura y Ganadería, se envía a profesionales de la agronomía a cursar estudios de posgrado a diversas universidades de EE. UU. Para 1948 surge la Escuela de Agricultura en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). Le seguirán, en orden de establecimiento, la Escuela de Agricultura y Ganadería de Sonora (1953), la Facultad de Agronomía de la Universidad de Nuevo León (1956), la Escuela de Agricultura de la Universidad de Sinaloa (1960), la Escuela de Agrobiología en Michoacán, la Escuela de Agricultura de Guerrero (1962) y, finalmente, La Escuela de Agricultura de la Universidad de Guadalajara (1964) en Jalisco (Mena y Ramírez, 2014).

Para 1970 se tenían 16 escuelas de agronomía en todo el país, en 1979 llegaron a 65 y para 1984 ya eran 127 escuelas entre licenciatura y posgrado. La matrícula escolar total de la educación agrícola superior en la década creció un 600%, al pasar de 7,378 alumnos en 1970 a 49, 257 en 1979. Estos egresados se orientaron a la atención de problemas regionales y las escuelas tenían como premisa arraigar a los egresados en su región (Robles, 1996).

En 1973 los institutos agropecuarios se suman más de 30 en todo el país y tenían como misión llevar la educación tecnológica directamente al sector productivo rural. Su política era formar un técnico profesional en cuatro semestres que sirviera de enlace entre el ingeniero agrónomo y los productores de la región.

Como se puede apreciar el papel que jugaba el Ingeniero Agrónomo en el desarrollo en el campo mexicano, desde su creación hasta 1980, fue cumplir con unos de ejes rectores del desarrollo del país, fue mejorar la producción y elevar los rendimientos por unidad de superficie, así como mejorar la calidad del producto, a partir de brindar asesoría a los productores en los diferentes cultivos que van desde los básicos hasta los industriales, para ello utilizaba semillas de variedades mejoradas y el uso óptimo de maquinaria agrícola e insumos productivos como fertilizantes químicos y pesticidas, es decir en pocas palabras el extensionismo, todos los agrónomos eran contratados por el sector público.

A partir de 1988 se presenta de manera contundente un fuerte desempleo y subempleo como efecto directo del abandono del campo por parte de las políticas públicas del gobierno federal, reflejado principalmente por la sustancial disminución de recursos para las actividades de extensión agrícola, a tal grado que sólo algunas instituciones de educación agrícola superior (IEAS) conservan vigente la formación de ingenieros agrónomos extensionistas. Sin embargo, por ser esa la esencia del ejercicio profesional agronómico, se conservan dentro del plan de estudios algunos cursos que tienen que ver con la asistencia técnica, la difusión del conocimiento, la capacitación campesina y la organización de productores.

Los cambios estructurales en las dependencias del sector público propiciaron una disminución de apoyo y fomento a las actividades del sector agropecuario, originando una drástica disminución de contratación de ingenieros agrónomos, lo que propició una disminución de servicios de extensión y se cortó de tajo la transferencia de tecnología y conocimientos de las instituciones de investigación y educación agrícola hacia los productores del campo.

Cleaves en 1988 menciona que los agrónomos a finales de los 80's, tenían un papel técnico, pero no decidían la política del país. Tampoco contaban con un proyecto profesional que tuviera su origen, o por lo menos haya sido influido en forma importante, por los intereses del gremio profesional, por su dependencia del estado era excesiva.

Las primeras secretarías en verse afectadas por el recorte de recursos presupuestales fueron la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, la Secretaría de la Reforma Agraria, así como bancos y empresas descentralizadas (Banrural, Fertimex, Pronase, etc.) que eran las principales fuentes de empleo para los agrónomos (Nieto, 1999).

Por lo anterior las instituciones de educación agrícola superior han tenido que realizar reestructuración y actualizaciones de sus programas de estudio, para cumplir con el perfil donde se propone que debe ser creativo, audaz, con liderazgo, con capacidad organizativa, con amplio sentido de la ética, con una visión de desarrollo sustentable, negociador y creador de su propio espacio de trabajo.

A inicios de la década de 1990 la SEP creó el Fondo para la Modernización de la Educación Superior (FOMES), en el que las IES públicas encontraron financiamiento para sus reformas curriculares, en las que empezaron a incorporarse los paradigmas emergentes, como la dimensión ambiental. Así, empezaron a surgir programas educativos (PE) relacionados con las ciencias ambientales, la biotecnología y la agricultura sustentable. La preocupación ecológica influyó el cambio curricular y la creación de nuevas carreras y posgrados: de 20 IEAS que reformaron sus currícula entre 1988 y

1995, incluyeron contenidos relativos a la agricultura sustentable o la conservación de los recursos naturales (Nieto Caraveo, citada por Gastelum-Escalante (2009).

El ingeniero agrónomo a partir de la década de 2000, se ha definido como aquel profesional que tiene la capacidad de gestionar, administrar, diseñar y optimizar la producción agrícola; además de crear y/o gerenciar actividades y empresas que manejen los sistemas de producción agrícola con criterios de competitividad, equidad, sostenibilidad y gran calidad científica y tecnológica, mediante la identificación, diagnóstico y solución de los problemas agrícolas trabajando de la mano con la preservación y conservación de los recursos medio ambientales (Cerón y Rosendo, 2017).

Con las nuevas tecnologías que se perciben como más eficientes para aumentar la producción de alimentos son la biotecnología agropecuaria y los cultivos protegidos en combinación con una agricultura de precisión en algunos casos, con administración computarizada de los principales insumos productivos para el éxito de los cultivos. Por otro lado, ante la globalización de la economía y la necesaria participación en los mercados internacionales, tanto de productores comerciales con grandes volúmenes de productos agropecuarios, como de pequeños y medianos productores con productos orgánicos, es necesario abordar los esquemas de inocuidad alimentaria, como requisito fundamental para alcanzar la competitividad (Mena y Martínez, 2014).

El COMEAA establece en su marco de referencia 2007, menciona que para que las instituciones de educación agrícola superior deseen acreditarse, deben considerar que el perfil del ingeniero agrónomo debe ser como un profesional con alto sentido de responsabilidad social y ética, cuya actividad principal es promover el desarrollo de la producción agrícola, pecuaria, forestal, agroindustrial y áreas afines emergentes. Emplea para ello principios científicos, procedimientos tecnológicos, de administración y de organización social, fundamentalmente para satisfacer las necesidades alimentarias de la sociedad. Que sea capaz de desarrollar y manejar procesos tecnológicos y servicios que incrementen la productividad en estas áreas; es consciente de la conservación y el mejoramiento de la calidad del ambiente y del aprovechamiento eficiente de los recursos físicos y socioeconómicos, con base en los conceptos de sustentabilidad y desarrollo de la sociedad (Mena y Martínez, 2014).

Las instituciones de educación agrícola superior en la actualidad, para elaborar el perfil que debe tener el ingeniero agrónomo será necesario considerar las políticas públicas, así como la agenda 2030 para la reconversión productiva del sector agropecuario, así como también el uso racional de los recursos naturales, elaborando estrategias de convergencia entre los intereses de la producción y la aplicación de los

principios de sostenibilidad, con la finalidad de seguir cumpliendo con las expectativas y demandas de campo laboral.

Por lo anterior el Ingeniero agrónomo debe tener las siguientes funciones y tareas profesionales en el campo laboral:

- a) Administra los recursos naturales y materiales bajo un enfoque sustentable, a fin de eficientar la productividad agrícola y pecuaria.
- b) Evalúa la productividad agrícola y pecuaria a fin de minimizar las pérdidas en toda la cadena de producción-consumo y aumentar los ingresos netos.
- c) Evalúa la viabilidad económica de los procesos de producción.
- d) Maneja de forma eficiente los productos terminales de los sistemas de producción.
- e) Propone esquemas de vinculación y organización entre los agentes responsables de la producción y comercialización de los productos agropecuarios.

En cuanto a las necesidades o problemas que contribuirá a satisfacer o resolver el Ingeniero Agrónomo Actual es:

- Contribuir a mantener y mejorar el patrimonio fitozoosanitario y de inocuidad agroalimentaria implementando medidas que reduzcan y prevengan la presencia de contaminantes físicos, químicos y biológicos en las unidades de producción.
- Promover el uso sustentable de los recursos naturales que intervienen en la producción agropecuaria.
- Incrementar la producción de alimentos en las unidades de producción agropecuarias mediante el establecimiento de sistemas agrícolas y pecuarios más integradores y eficientes a nivel local y nacional.
- Fortalecer la resiliencia de los medios de subsistencia basados en la agricultura frente a los múltiples riesgos.
- Minimizar las pérdidas en toda la cadena de producción y consumo a fin de aumentar los ingresos netos.
- Promover el acceso de las mujeres productoras en el sector rural a los servicios de financiamiento, asistencia técnica y mercados.
- Brindar capacitación, asistencia técnica y organización a los productores para lograr su integración en esquemas de comercialización. Adoptar innovaciones tecnológicas y su apropiación y validación, así como participar en la transferencia de tecnología a los productores, adecuándolas a un desarrollo sustentable.

- Gestionar la adquisición de maquinaria, equipos e instalaciones innovadoras en los sistemas de producción agropecuarios.
- Promover el desarrollo de capacidades empresariales y de autogestión de las y los productores en los territorios rurales para la creación de micro, pequeñas y medianas empresas.
- Brindar asistencia técnica para elevar la calidad, eficiencia, productividad y competitividad de sistemas de producción agropecuarios.
- Fomentar políticas, programas y acceso al financiamiento formal a fin de obtener recursos para la producción agropecuaria.
- Realizar investigación básica y aplicada para la resolución de problemas en los sistemas de producción agropecuaria.

Con respecto a los ámbitos de intervención profesional el Ingeniero Agrónomo desarrolla lo siguiente:

- Manejo sustentable de sistemas de producción agrícola y pecuarios.
- Producción, conservación y utilización de forrajes para alimentación de ganado.
- Producción, distribución, conservación, comercialización y promoción para el consumo de productos y subproductos para la alimentación humana.
- Alimentación del ganado de interés zootécnico.
- Técnicas de reproducción y mejoramiento genético de plantas y animales.
- Prevención y tratamiento de enfermedades de las plantas y animales.
- Obtención de alimentos de origen animal y vegetal inocuos de calidad.
- Gestión, administración y ejecución de proyectos agrícolas y pecuarios.
- Asesoría técnica en las unidades de producción agrícolas y pecuarios con un enfoque sustentable.

3. CONCLUSIONES

El Ingeniero Agrónomo no importando la especialidad ha sido y será siendo el profesional en el área de las Ciencias Agropecuarias que proponga, diseñe y desarrolle estrategias de organización, gestión y autogestión ajustadas a criterios de competitividad, equidad, sostenibilidad y participación. Realizará proyectos de investigación con la finalidad de buscar el desarrollo agropecuario y de manejo de recursos naturales, interesándose en promover la motivación y organización de la comunidad, en especial de los pequeños productores para buscar soluciones concretas que permitan mejorar la calidad de vida de la sociedad rural, con ayuda de la transferencia de tecnología y parcelas demostrativas.

Desde que se inició la educación agrícola en el país, siempre se ha tenido como propósito que el ingeniero agrónomo sea un profesional con un desarrollo profesional muy amplio, lo que le exige convertirse en un ente competente alrededor de muchos aspectos, como es la resistencia de los cultivos a plagas y enfermedades, resistencia a condiciones ambientales, producir más por unidad de superficie y de una buena calidad. Por lo que las Universidades que ofrecen este tipo de estudios profesionales, están en constante actualización de sus programas educativos, dándoles su plus a los profesionales dependiendo de la zona en donde se ubiquen. Para destacar las competencias de los profesionales del agro mexicano que les permiten establecer sus respectivos y múltiples perfiles, afín de cumplir con las necesidades del campo laboral.

BIBLIOGRAFÍA

Arce G.F.; Bazant M., Staples A., Tanck E.D., Zoraida V. J. 1982. Historia de las profesiones en México. El Colegio de México. 406p.

Cerón G. D. M. y Rosero L. A. S. 2017. Consideraciones sobre competencias, Tendencias y el Perfil del Ingeniero Agrónomo como Extensionista Rural en la Actualidad. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Colombia.

Cervantes S. J. M. y Saldaña J. J. 2010. Las estaciones experimentales en México (1908-1921) y su contribución a la ciencia agropecuaria mexicana.

Contreras S. C. y Galindo M. M. G. El nacimiento de una profesión: La agronomía y la enseñanza agrícola en México (1832-1910). Revista Inclusiones Vol: 8 núm. 4 (2021): 71-83.

Cleaves, Peter S. 1985. Las profesiones y el Estado: el caso de México. El Colegio de México, México.

Cleaves P. 1988. Las profesiones y el estado: el caso de México: Serie Jornada del Colegio de México, México. 244p.

García V.; J. Pérez y Molina A. 2003. Desastres Agrícolas en México. Catálogo Histórico. Tomo I. Épocas prehispánica y colonial (958-1822). Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (México: Fondo de Cultura Económica. México).

Gastelum E. Jorge. 2009. "Los profesionales de la agronomía en México: intelectuales del consenso en la política agrícola. El caso del currículum de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa", Ra Ximhai. Vol. 5, núm.2, mayo-agosto, pp.133-153. Universidad Autónoma Indígena de México.

Mena M. S. y Ramírez M. M. 2014. Panorama de la agricultura en México. Editorial Universitaria: Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. 240p. México. ISBN 978 6077420330.

Nieto C. L.M. 1999. Agronomía y Medio ambiente: ¿Un siglo de revoluciones?, Revista Universitarios, Vol. VII, No. 5, Nov-Dic. Editorial Universitaria Potosina, México.

Pérez T. R. 2010. Historia de la Ciencia en México. Editorial Fondo de Cultura Económica (FCE), CONACULTA, Colección Biblioteca Mexicana, México. ISBN 9786074553307.

Reyes C. P. 1981. Historia de la agricultura. Información y síntesis, AGT Editor. S.A., México pp. 70- 71.

Universidad Autónoma del Estado de México/Centro Universitario UAEM Zumpango. 2023. Proyecto curricular de la Licenciatura de Ingeniero Agrónomo en Producción, Zumpango, Estado de México.

Urbán M. G. A. 2005. Fertilizantes químicos en México (1843-1914). (Tesis de Maestría en Historia), Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 2005, 60-173.

Zepeda J. M. 1982. Estudio Histórico de la Educación Agropecuaria en México. Textual Vo.3 No. 10, diciembre de 1982. Universidad Autónoma de Chapingo.

Zuleta M.C. 1999. La prensa agrícola del porfiriato como fuente para la historia económica (Ensayo de Fuentes). Signos Históricos 1.2 (diciembre 1999), 59-88. <https://www.coiaanpv.org/ingenieria-agronomica/la-profesion/informacion-general-de-la-profesion/id/10731>, consultado 9 de junio de 2025.

SECOND GENERATION FRUGAL INNOVATION - TOWARDS APPROPRIATE FRUGAL AGRICULTURAL INNOVATION FOR FAMILY FARMS IN ANGOLA

Data de submissão: 19/05/2025

Data de aceite: 11/06/2025

Jone Heitor Sebastião¹

Faculté d'Ingénierie de
l'Université Agostinho Neto – FEUAN
Luanda, Angola

Jean-Pierre Caliste²

Université de Technologie de
Compiègne - UTC
Compiègne, França

Henri Dou³

Université Aix-Marseille
Aix Marseille University
Hôtel de l'Industrie, France
<https://orcid.org/0000-0002-2990-5589>

ABSTRACT: Second-generation frugal development is based on the fact that locally, on family farms, crops remain based

¹ Jone Heitor SEBASTIAO, Ministerio do Ensino Superior, Ciência Tecnologia e inovação, Bairro Talatona, Rua do Mat, Complexo Administrativo, "CImassicos de Talona", Edifício nº2, 7º andar, Luanda Angola.

² Jean-Pierre Caliste Professeur Émérite, Université de Technologie de Compiègne.

³ Henri Dou, Professeur Université Aix Marseille (R), Académie de l'Intelligence Economique, Hôtel de l'Industrie, 4 Place St Germain des prés, Paris 75006, France.

on ancestral protocols far removed from all current technological aspects. Based on this observation, it is possible, through a retrospective search for old technologies, to select those that would be adaptable to the local context, then to improve them using more modern technologies. Behind the expression "more modern technologies", lie, as discussed in the rest of this article, 3D polymer or metal printing, but also, in fact, all the basic elements of enterprise 4.0 and in particular the possibilities of computer-aided design, simulation and optimization. Possibilities necessary for production by 3D printing and allowing an upstream study of structured production around digital technology. This is what we call "second-generation frugal development". The use of 3D printing in Angola has been developed over the past 10 years at Agostinho Neto University in collaboration with France, which led to the creation of the experimental laboratory Yeto Lab. Based on this experience and because the use of 3D printing is beginning to develop in agriculture, we will implement "second-generation frugal development" using products developed locally at the university. The objective is to create a Living Lab in an experimental village to test and integrate technological systems into family agricultural production. The work presented here aims to take stock of scientific productions in this field and mainly on the state of African work. To this end, various search equations were tested on the Web of Science (WoS). It took several attempts to arrive at a

search equation representative of the subject. The results highlight a wide dispersion of topics, with the following overall clusters: 3D-related aspects - agriculture and precision farming - mechanical properties - IoT Internet Big Data - food sector - environment. However, African research remains embryonic except for South Africa and Nigeria.

KEYWORDS: family farming; 3D printing; additive manufacturing; agriculture; frugal development; Angola; enterprise 4.0; Africa; competitive intelligence.

1. INTRODUCTION

Access to suitable agricultural tools is a crucial issue for the development of family farming in Angola. In a context where imported equipment is often expensive, unsuitable for local conditions, or difficult to maintain, it is becoming strategic to explore more frugal, inclusive, and locally anchored avenues of technological innovation. This contribution proposes an original methodology consisting of revisiting old technical patents [Dou & Sebastião, 2021], which have fallen into the public domain, to reinterpret them using the design and production tools of the Industry 4.0 era.

The objective is twofold: first, to identify robust and proven technical solutions that could meet the needs of small producers; second, to promote their adoption through modern design and production methods and tools that enable local adaptation, low-cost manufacturing, and active user participation. A pilot project is currently underway to redesign a seed drill for the needs of Angolan family farms. It is expected to be followed by other projects, such as a solar dryer. It aims to illustrate a circular, open, and territorialized engineering approach.

2. CONTEXT

Angola, like many sub-Saharan African countries, relies primarily on family farming for its food supply. [Corazza et al. 2016] In Angola, it represents almost 80% of national production [de Oliveira Pinto et al. 2023]. However, this agriculture remains largely under-equipped and poorly mechanized, which severely limits its productivity and resilience to climate change. Commercially available agricultural machinery, often designed for large-scale intensive farms, is difficult to adapt to local realities: it requires unavailable engine power, requires specific technical skills, or relies on imported spare parts that are too often unavailable for too long, if ever.

Too often, technological approaches to agriculture ignore the material, social, and cultural realities of their main stakeholder: the farmer [Fernand & Zié 2024]. Solutions that appear simple and technically sound fail to be deployed locally due to their inadequacy in

real-life living and working environments. This is not due to a lack of skills or knowledge on the part of producers, but rather to a failure to adapt the proposed technologies to their uses, constraints, and perceptions.

This observation leads to a broader question: how, historically, has innovation – understood as the progressive improvement of practices and tools – spread in agricultural environments? What forms of local ingenuity, trial and error, have enabled the emergence of appropriate solutions? We hypothesize here that old patents, often forgotten, constitute tangible traces of this pragmatic innovation process [Davies 2009]. Reexamining them in the light of contemporary tools could pave the way for a new, more deeply rooted technological dynamic to serve Angolan family farming. In this context, the rereading of old patents offers an underexploited potential [Dou 19a, 19b]. These technical documents contain solutions that are sometimes simple, robust and designed for contexts where resources were also limited. The idea is therefore to extract from these technological archives relevant material to feed frugal innovation processes, at the crossroads of participatory engineering and digital manufacturing.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. PATENTS: A LIVING TECHNOLOGICAL ENCYCLOPEDIA

Patents, which represent all technological achievements developed over the years, are rarely or not at all used in research [DOU 2015]. Indeed, a quick analysis of the bibliographies of most scientific works highlights the absence of patent citations. This is due, among other things, to a lack of collaboration between universities and industry, which is particularly true in developing countries but also in advanced countries. Patents, which are considered here simply in terms of their technological content, precisely describe the protected objects, uses, and equipment, both textually and often descriptively with drawings. There are many patent databases, among the most used are the “patent worldwide” database of the EPO (European Patent Office) [EPO 2025a 2025b], the Patent Scope database of the WIPO (World International Patent Organization) [WIP 2025] or the European patent database [EUP 2025]. Other national patent databases are also available. These databases can be consulted free of charge via the Internet, but to perform an automatic analysis, subscription systems such as Patent Pulse [MAT 2021] which will be used in this presentation facilitate the work.

A patent thus provides access to the technological content it protects. Note that patents over twenty years old are in the public domain, as are patents (lapsed) whose

holders no longer pay annuities. The patent databases will be searched (here we consider the worldwide database) in English, using words or expressions contained in the titles or titles and abstracts. This database contains approximately 130 million documents. This search can be completed by using the International Patent Classification [EPOb 2021], which divides all technologies into a set of 8-digit codes, ranging from a general aspect to increasingly specific areas. For example:

A = human necessities

A01 = agriculture; forestry; animal husbandry; hunting; trapping; fishing

A01B = soil working in agriculture or forestry; parts, details, or accessories of agricultural machines or implements, in general

A01B3= other machines for working soil

A01B35/26 = other machines for working soil; rigid tools

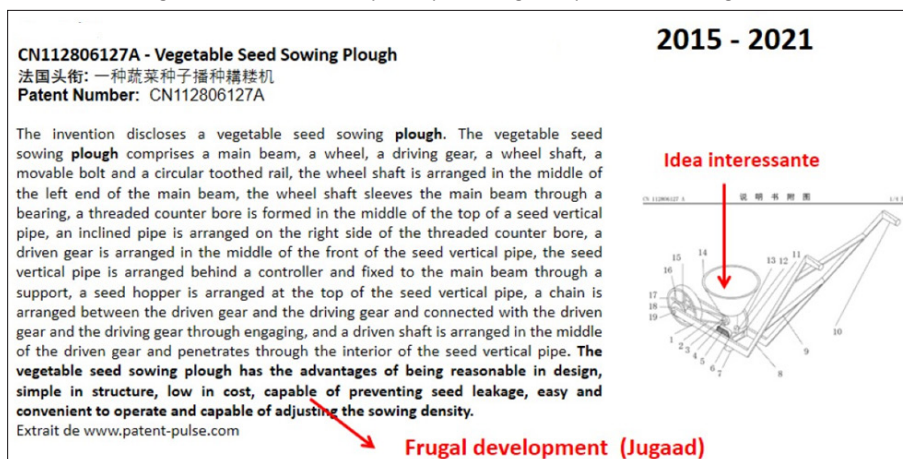
The reader will find a complete description of the IPC on the EPO website [EPOb 2021].

3.2. THE TECHNOLOGICAL WINDOW OF OPPORTUNITY

What do we observe when analyzing the contents of the EPO's worldwide patent database? We see that the number of patents is growing, and that around 2019, the number of Chinese patents and utility models became predominant in global production [GUR 2020, DOU 2012]. It should also be noted that in many cases, 20 to 30% of this Chinese production involves universities as applicants, highlighting the technological commitment of the Chinese higher education system. We also note that technological complexity increases over the years; in more recent years, the protected technologies, equipment, and applications are increasingly sophisticated, and the technologies are increasingly complex, generally speaking, with rare exceptions.

However, among recent patents, we can cite Chinese patents that address the subject with frugal improvements or that present particularly simple and transposable ideas. As an example, we selected the following Chinese patent shown in Figure 1 (window of opportunity 2015-2021).

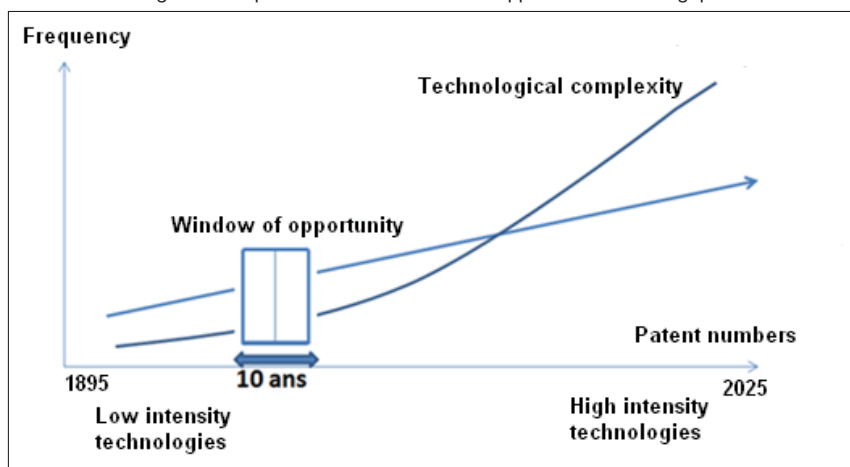
Figure 1 – Recent Chinese patent presenting a simple and interesting idea.



Since this patent is recent, it will be necessary to wait at least two years to know if it has been extended to African countries. If not, the idea and its implementation could be legally copied.

The technological window of opportunity will work as follows: by taking a date range, for example, 10 years, and using the same query, but varying the date range, we will move through the years, highlighting more or less advanced technologies. Thus, the window of opportunity can be represented as shown in Figure 2. By conducting multiple queries limited to intervals of 10 years or other years (10 is the time range chosen for this example), we can thus observe technological developments for a given object or piece of equipment and thus choose, based on local possibilities, the most appropriate technology to achieve the set objective: developing endogenous production.

Figure 2 – Représentation de la fenêtre d'opportunité technologique.



4. EXAMPLE – AUTOMATED SEEDER

4.1. SECOND-GENERATION FRUGAL TECHNOLOGIES

A pioneer in the use of frugality, Navi Radjou [RAD 12] states in his founding principles:

To seek opportunity in adversity requires a new look and charisma.

To do more with less is often the way to respond to consumers' needs, those who want to meet a particular need without constantly offering “improvements” intended by the manufacturer and not necessarily desired by the consumer.

Achieve lower costs through clever use of existing technologies. Doing more with less is often the solution to meet the needs of consumers, who wish to satisfy a specific need without constantly proposing “improvements” planned by the manufacturer and not necessarily desired by the consumer. Reducing costs through the intelligent use of existing technologies.

Today, while these principles remain in force, spectacular developments have been made in general technological applications that can be applied to a wide range of activities. Thus, the production of simple tools or systems found in retrospective research, if they fall directly within the frugal principle, will benefit from much more advanced technologies than those used at the time. This is what we call “second-generation frugal technologies.” In fact, the final product will be the same or may possibly be improved, but the technological advances used to create it will not be apparent. Thus, the initial simplification sought and the ease of use will remain the same.

To clarify, we can give an example. In hot countries, greenhouses are often used to grow, for example, market garden plants. Their role is the opposite of what we are developing in Western countries. Indeed, in Africa, the undergrowth cultivation that protected plants from the effects of the sun and heat has disappeared due to deforestation (to obtain charcoal). We must therefore examine the problem of greenhouses not to produce heat, but to prevent its accumulation! Different solutions are possible, including pagodas with successive ventilated roofs that will create a beneficial air current as well as shade. This solution has existed for several millennia, but the modern implementation of such systems will benefit from all the progress made in fluid mechanics, measurements obtained with thermal cameras, etc. This will ultimately lead to a greenhouse that, for an uninformed person or for the end user, will seem very simple or even trivial, without realizing the modern technological contributions used to establish its final structure. We then have a solution that appears simple, even simplistic, but which underlyingly comes from a second generation and the “invisible” integration of advanced technological contributions.

It is within this framework that the experiments carried out in Angola in the field of agriculture are situated. These experiments are partly the work of the Yeto Lab developed within the framework of the Angola-France cooperation at the Agostinho Neto University in Luanda. An analysis of the value of the family farming sector (generally 2-hectare farms) made it possible to determine the products (services will be addressed in a second step) that it needs most. This list, with the necessary priorities established, leads to a search, firstly, for frugal solutions and, secondly, for the realization of these solutions by including in an “invisible” way the decisive contribution of new processes with high added value. This refers to 3D printing, for example, but also, in fact, all the basic elements of the 4.0 company and in particular the possibilities of computer-aided design, simulation and optimization.

4.2. TRACKING A TECHNOLOGY OF AUTOMATED SEEDERS OVER TIME

For this tracking, we conducted queries of the global patent database over ten-year periods. This allows us to see the flow of patents produced, on the one hand, and to analyze this flow based on the filing countries and the protected technologies, on the other. The use of patent databases and their statistical analysis has been described by Dou et al. [DOU 19a, DOU 19b]. The data obtained are as follows:

Table 1 – Temporal Evolution of automated seeders.

Interval	Number of patents	Number of families ⁴
2025,2020	3987	3619
2019,2010	5964	5173
2009,2000	1178	932
1999 ,1990	864	686
1989,1980	509	432
1979,1970	194	167
1969,1960	78	73
1959,1950	153	147
1949,1940	50	49
1939,1930	98	97
1929,1920	88	88
1919,1910	121	121
1909,1900	130	130
1899,1890	33	33

⁴ A patent can be extended in different countries. Therefore, the same invention can lead to different patents. This set is called a patent family.

Time evolution seeder

Time Period	Nb Patents	Nb Families
2025-2020	3900	3500
2019-2010	5900	5100
2009-2000	1100	900
1999-1990	800	600
1989-1980	400	400
1979-1970	200	100
1969-1960	50	20
1959-1950	100	100
1949-1940	50	20
1939-1930	100	50
1929-1920	50	20
1919-1910	100	50
1909-1900	100	50
1899-1890	50	20

Analysis of the countries registering patents will complement this argument.
(See below.)

Table 2 – Countries submitting applications for seed drills.

[illegible]

1999, 1990	CN286	JP133	KR131	EP42	FR41	AU38	ES26	US21	DE23	CA20	SU19	RU15	PL11	BR9	IT8	AT6	HU6	UA4	WO4	GB3	AR2	DK2	YU2	BG1	MA1	PH1	SI1	TN1	TW1
1989, 1980	JP195	SU67	ES36	AU31	EP25	CN23	US21	KR19	CA13	FR13	DE10	PL10	BR8	GB8	DD4	AT3	CS3	SE3	ZA3	IT2	NZ2	PH2	RO2	BE1	DK1	GT1	HU1	IE1	MA1
1979, 1970	SU58	JP42	ES34	US12	FR11	AU9	BR5	CA4	PH3	DE2	IT2	PT2	BE1	BG1	CH1	GB1	GT1	IN1	CA1	PL1	RO1	YU1							
1969, 1960	SU22	FR19	ES14	US9	CA6	BE3	CH2	FI2	AU1																				
1959, 1950	US42	ES18	FR13	CA8	CH4	GB3	FI1																						
1949, 1940	SU23	US14	FR6	CA4	CH2	ES1																							
1939, 1930	SU58	US19	ES9	CA6	FR5	FI1																							
1929, 1920	US30	CA24	FR23	SU7	ES3	FI1																							
1919, 1900	US83	CA35	FR7	ES5																									
1899, 1890	CA19	US8	CH2	ES2	GB2																								

Table continued. As much data as possible has been included in the table for better comparison.

1989,1980 YU=1 PT=1 MA=1 1999,1990 ZA=1 YU=1 TW=1 **2009,2000** PE=1 PH=1 YU=1 ZA=1 **2019,2010** CO=2 DK=2 MA=2 PT=2 TR=2 AP=1 CR=1 DO=1 EC=1 GE=1 HK=1 IL=1 JO=1 LU=1 MX=1 NL=1 RO=1 SG=1 **2020,2015** DK=1 FI=1 GB=1 HR=1 LU=1 NL=1 NZ=1 PT=1 RO=1 TR=1

The meaning of the country codes used in the table can be found at the following internet address: <https://register.epo.org/help?lng=fr&topic=countrycodes>

We can see from the table above that initially, in the earliest years, it was countries that had developed agriculture over large areas or had a strong agricultural culture that were concerned with seed drill issues, since they were an essential step towards achieving the best possible yield.

Thus, Canada, the United States, Russia, France, and Spain were leaders in the field. This continued until the 1970s. The decade from 1970 to 1980 appears to be a transitional period that heralded a change in agricultural practices, moving towards a massive expansion of cultivated land. The following period saw the direct introduction of this change in practice. This led to both national technological developments and a market for seed systems, with the emergence of patents from countries that did not necessarily have an agricultural tradition. The case of China is classic, as it only extends its patents very little, but it constitutes, due to the number of Chinese patents filed, a protection against any extension or filing of patents from other countries. This is often referred to as the “patent great wall” [DOU 12]. It should also be noted in the case of China that a very large number of “patents” are in fact utility certificates, the examination of which is often carried out on the form, the substance being examined in the event of a dispute. [DOU 13]. In recent periods, we note a fairly low number of real innovations, the patents often being focused on improvements.

It should be noted that countries with a strong agricultural tradition, particularly in the areas of cereals and market gardening, remain prominent throughout all periods considered.

It should also be noted that the potential effects of the two wars of 1914-1918 and 1939-1945 do not disrupt the patent filing graph shown in Figure 1.

5. FRUGAL DEVELOPMENT SYSTEMS

The term frugal is used here to mean the search for low-intensity technologies that can be easily adapted to countries whose technological and economic development does not allow for a rapid and significant qualitative leap in the practices concerned by this development [BOR 21] [IQB 21] [KIS 22]. We will therefore seek simple ideas, which in our case will be derived from patents that have “fallen” into the public domain (more than twenty years old) or have been abandoned. The method used as explained above, is to vary a 10-year window of opportunity and analyze, within these time intervals, the ideas, concepts, and techniques that could be integrated into frugal development. In this case, the applications are intended for very localized family farming, i.e., smallholdings. This is often found in various African countries where the lack of material resources does

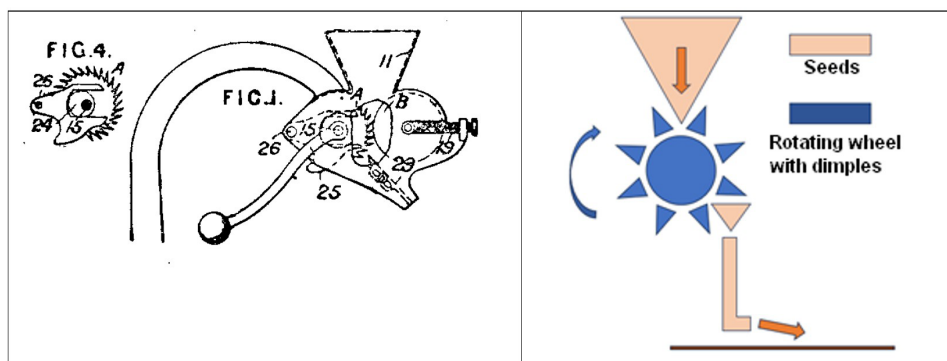
not allow for a direct technological leap. We will give two examples that can easily be integrated into the development of low-tech products, which does not mean that we are returning to the materials used in those earlier years.

Example 1

Great Britain Patent GB189711721A date 1898

This patent does not directly concern a seed drill, since it concerns the extraction of grape seeds by means of toothed wheels. But, what is important is that it generates the idea that one could make a simple seed drill, where from a reservoir of seeds, these could enter by gravity between the teeth of a toothed wheel animated by a circular movement resulting from the path of the seed drill on the ground. The seeds are then distributed according to the interval present between two teeth of the wheel and also by the speed of rotation of the latter. Such a system could be made via 3D printing [SCH 23].

Figure 4 – On the left, diagrams from the British patent. On the right, a seeder based on the previous idea.



The seed spacing can be adjusted using different wheels with different diameters. The cells on the wheel are designed according to the size of the seeds to be placed. The circular movement of the wheel is achieved via the wheels supporting the system, which can be manipulated manually or attached to an animal or a mechanical system. The system designed based on data from the British patent is currently undergoing a utility model certificate with the Patent Office of the Republic of Angola [OFF 25].

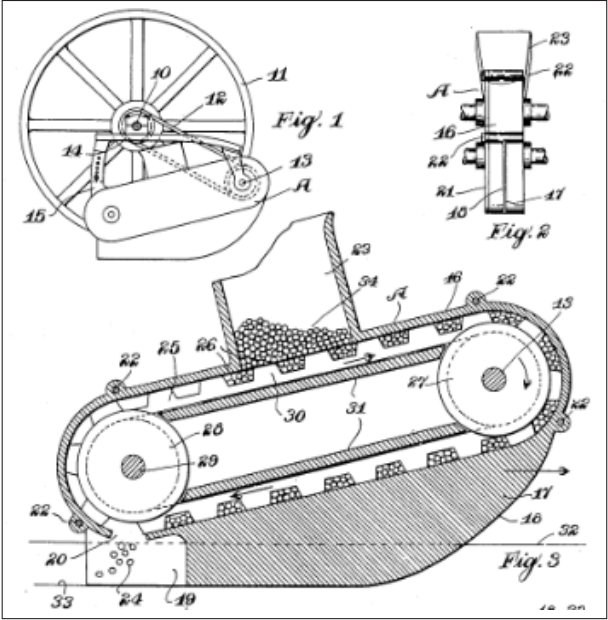
Example 2

United States Patent US2141044 date 1935

The main feature of this system is the distribution of seeds from a belt with cells allowing the capture of seeds from the reservoir containing them. Then a rotary movement linked to the motion of the system drives the belt and therefore the deposit of seeds on the ground. The speed of motion as well as the interval between the cells allow the seed

deposits to be spaced appropriately. It should be noted that 3D printing is often used for the production of transmission belts [PAM 25].

Figure 5 – Seed distribution by belt system.



6. PROGRESS OF THE FIELD IN AFRICA

For the remainder of the study, it is important to have a clear view of the progress of studies in this field in Africa. This is both to understand their level and to potentially establish collaborations based on the progress of certain projects. To do this, we used the World of Science (WoS) database using a search equation that includes the use of 3D technology, since we want to introduce it into the implementation of basic ideas that could lead to products integrated into the development of family farming.

6.1. RESULTS OBTAINED FROM THE WEB OF SCIENCE (WOS) DATABASE

The Web of Science is an internationally recognized database. Although criticized by some for its commercial and Anglo-Saxon orientation, it nevertheless constitutes a working basis that should not be overlooked. To this end, and after testing numerous search equations, we focused on the following research:

TS = ((additive manufacturing) OR (3D printing)) AND (agricultur* or smallholder* or farm*)) or 297 references

Authors

The distribution of authors reflects low networking, meaning the very low presence of structured networks. This indicates that the field of research is new, and that the formation of collaborative research groups is particularly low. The distribution of authors by publication frequency is shown in the following table.

Table 3- Distribution of authors by publication frequency.

Frequency of publications	Number of authors
5	4
4	4
3	24
2	137
1	3307
Total number of authors	3476

Because VoSviewer [WOS 2025] (free software to draw networks between authors, keywords,..) cannot process more than 1,000 authors, we did not create a network. Indeed, with a publication frequency greater than or equal to 2, which results in 169 authors, and therefore analysable by VoSviewer, we do not obtain a significant network.

6.2. KEYWORDS

There are different types of keywords in the WoS: those of the WoS and those of the authors. To stay as close as possible to the topics developed by the authors, we used the author keywords. To make the network more readable, the two terms “additive manufacturing” and “3D printing” were removed. The frequency of the keywords used to create the network is 2. The network is presented in figure 6.

It can be seen that the work carried out in this field is very recent. This clearly shows that the subject is in its early stages of development and that we are at the emerging stage of research. There is also a diversity of approaches.

Indeed, various clusters emerge: mechanical properties – sustainability – circular economy – soft robotics – food.

For agriculture, we did not exclude this theme, although it was part of the research equation, but this enable to access topics related to this field. This is presented in figure 7.

The graph illustrates the interconnectedness of research topics in food and agriculture. The nodes are colored based on the year of publication, with a color scale ranging from 2016 (dark blue) to 2024 (yellow). The size of the nodes and the density of the connections indicate the relative importance and growth of these topics over time.

Key clusters and topics include:

- Sustainability and Circular Economy:** Central nodes like 'sustainability', 'circular economy', 'biomass', 'composites', and 'waste management' are highly interconnected.
- Food Safety and Quality:** Nodes such as 'food safety', 'food quality', 'food regulation', 'health risk', and 'food printing' are prominent.
- 3D-Printing and Vertical Farming:** '3d-printing' and 'vertical farming' are emerging topics with strong connections to 'food printing' and 'barriers to innovation'.
- Artificial Intelligence and Robotics:** 'artificial intelligence', 'soft robotics', 'internet of things', and 'automated' are part of a growing cluster.
- Food Processing and Packaging:** 'food processing', 'bioplastic', 'drug delivery', 'hydrogels', 'nanoparticles', 'poly(lactic acid)', 'chemical composition', and 'thermal conductivity' are interconnected.
- Animal Feed and Aquaculture:** 'feed additives', 'animal feed', 'protein', 'chitosan', 'flax', 'antioxidant activity', 'polyphenols', and 'by-products' are part of a cluster related to food production.

The graph shows a clear trend of increasing research activity and interconnectedness over time, particularly in the areas of sustainability, food safety, and emerging technologies like 3D-printing and vertical farming.

In the case of agriculture, the following themes are highlighted: IoT, blockchain, and automation – sensors and printed electronics – rapid prototyping – recycling – biological aspects of biotechnology, bioprinting, bioplastics – aspects related to medicine, drug delivery – aspects related to nutrition (food feed), irrigation – additives – wood

205

The main countries covered by the research in terms of the number of publications are the USA (154) – People's Republic of China (93) – India (83) – England (51) – Italy (49) – Spain (38) – Australia (32) – France (29) – Canada (29) – Germany (28) – South Korea (26) – Japan (21) – Greece (20)

Table 4 - African countries by number of publications.

Estudos em Ciências Agrárias e Ambientais IV

Ivory Coast	1
Ghana	1
Morocco	1
Sudan	1
Algeria	1
Botswana	1
Cameroon	1
Benin	1

If we consider the main African countries, excluding North Africa, we see a beginning of interest, with two exceptions: South Africa and Nigeria.

7. CONCLUSION

The use of retrospective research in the field of intellectual property allows the highlighting of old technologies, relatively crude, but adaptable to the context of the development of family farming in Africa. The development of equipment from these technologies can currently benefit from the contributions of new technologies such as, for example, 3D printing. In this field, and in agriculture, this technology is in full development mainly at the level of large companies in terms of spare parts and electronic inventory management. As far as Africa is concerned, very few publications concern the subject, but nevertheless we note that certain countries: South Africa, Nigeria and Egypt (although this country does not directly enter the geographical area that concerns us) are beginning to acquire significant experience. Given the ease of implementation of 3D printing technology, its use in the design of small mechanical equipment will only continue to grow. Its use in agricultural equipment is therefore an orientation to be developed, which will allow a more inclusive approach to research.

8. REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Ambassade de France en Angola ainsi que Total Energie Angola pour leur aide qui nous permet de poursuivre ces travaux de recherche et d'application.

BIBLIOGRAPHY

Borchardt, M., Pereira, G., Ferreira, A.R., Soares, M., Sousa, J. and Battaglia, D., 2021. Leveraging frugal innovation in micro-and small enterprises at the base of the pyramid in Brazil: an analysis through the lens of dynamic capabilities. *Journal of Entrepreneurship in Emerging Economies*, 13(5), pp.864-886.

Corazza, G., Ferreira, A.B.F. and Breitenbach, R., 2016, October. Agricultura familiar e sua

- heterogeneidade: comparativo entre Brasil, Cabo Verde, Angola, Canadá e Espanha In 5º Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT).
- Davies, S., 2009. New uses for old patents. *Chemistry & Industry*, (11).
- de Oliveira Pinto, O.R., de Miranda Pinto, C., Amorim, A.V., de Aguiar, M.I., de Araújo Costa, C.T., da Luz, L.N., de Oliveira, E.G. and Novaes, A.M.C., 2023. Agricultura familiar e agroecologia no contexto dos países lusófonos. *Revista de Gestão e Secretariado*, 14(11), pp.19570-19587.
- Dou, H., & Sebastião, J. H. (2021). Intelligence économique et innovation frugale dans les pays en développement. La fenêtre d'opportunité technologique à partir de l'analyse des brevets: Note technique de l'Académie de l'Intelligence économique. *Revue internationale d'intelligence économique*, 13(2), 105–116.
- Dou, H., Juillet, A. and Clerc, P., 2019a. *Strategic Intelligence for the Future 1: A New Strategic and Operational Approach*. John Wiley & Sons.
- Dou, H., Juillet, A. and Clerc, P., 2019b. *Strategic intelligence for the future 2: A new information function approach*. John Wiley & Sons.
- Dou, H., and Dou, J-M. Jr. 2013. Chinese Patent-A Tentative Explanation of Various Strategies of Patenting. *Chinese Business review*, 12(1).
- Dou, H. and Hongxia, X., 2012. The role of Patent Information in the development of Innovation in SMEs-A focus on Chinese patent. *Revue internationale d'intelligence économique*, 4(2), pp.187-203.
- European Patent Office, 2025, European Patents full text, https://www.epo.org/searching-for-patents/data/bulk-data-sets/data_fr.html
- European Patent Office - Espacenet Patent Search worldwide 2025a https://worldwide.espacenet.com/advancedSearch?locale=en_EP
- European Patent Office – Cooperative Patent Classification 2025b https://worldwide.espacenet.com/classification?locale=en_EP
- Fernand, K.K. and Zié, B., 2024. De l'imaginaire au réel du développement durable: Comment mesurer les progrès accomplis vers l'idéal d'une agriculture familiale africaine durable?. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 44(pp.517-530
- Gurry, F., ,2020, La Chine devient le principal déposant de demandes internationales de brevet en 2019, dans un contexte de forte croissance des services de propriété intellectuelle, des adhésions aux traités et des recettes de l'OMPI, *Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle*, https://www.wipo.int/pressroom/fr/articles/2020/article_0005.html
- Iqbal, Q., Ahmad, N.H. and Halim, H.A., 2021. Insights on entrepreneurial bricolage and frugal innovation for sustainable performance. *Business Strategy & Development*, 4(3), pp.237-245.
- Kister, J. Dou, H. and Lebreton, M., 2022. Economic Intelligence and Frugal Development: Application to La Reunion island. *International Multilingual Journal of Science and Technology*, 7(1).
- Matheo Software, 2025. www.matheo-software.com
- Office des brevets de la République d'Angola. 2025. <https://gue.gov.ao/portal/marcas-e-patentes-iapi>

PAMI3D. Impression 3D de courroies sur mesure. (2025) <https://www.pami3d.com/industrie-impression-3d/courroie-en-impression-3d/>

Radjou, N., Jaideep Prabhu, Ahuja, S., Roberts, K. Jugaad Innovation: Think Frugal, Be Flexible, Generate Breakthrough Growth, Amazon, 2012. <http://www.amazon.com/Jugaad-Innovation-Flexible-Generate-Breakthrough/dp/1118249747>

Schné, Tamás, and Szilárd Jaskó. "3D printing in agriculture-review." *Georgikon for Agriculture*, 27.2 (2023): 45-54.

WOS, Welcome to WoSviewer, 2025. <https://www.vosviewer.com/>

WIPO, 2024. Patent Scope, Guide de l'utilisateur https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/fr/patents/434/wipo_pub_l434_08.pdf

SOBRE O ORGANIZADOR

EDUARDO EUGENIO 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

Símbolos

3D printing 192, 193, 198, 202, 203, 204, 205, 207, 209

A

Abono 102, 103, 105, 106, 115, 116, 121, 123

Accesión 133, 134, 137, 138, 139, 143, 145, 147, 148, 149, 150

Adaptive management 86, 99

Additive manufacturing 193, 203, 204

Africa 26, 42, 60, 149, 193, 197, 203, 206, 207

Agriculture 65, 103, 123, 124, 151, 164, 177, 178, 180, 192, 193, 195, 198, 201, 204, 205, 207, 208, 209

Agronomía 128, 177, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 190

Almacenamiento 133, 134, 135, 137, 138, 139, 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150

Angola 192, 193, 198, 202, 207, 208

Aplicación del método científico 179

Aquaculture 1, 2, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 24, 26

B

Biomedicina 28

C

Cambio climático 36, 100, 107, 133, 134, 137, 139, 141, 143, 145, 146, 148, 150, 151

'Canon' bell pepper 153, 154, 155

Climate change 86, 87, 97, 98, 99, 100, 101, 134, 159, 193

'Closter' tomato 153, 154, 155

Coccidiosis control 38, 46, 54, 59

Color L*a*b* 153, 154, 155

Competitive intelligence 193

Costos 129, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 165

D

Density 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 83, 84

Desarrollo rural 179

Desarrollo sustentable 28, 29, 186, 188

Distribución 68, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 80, 133, 134, 135, 136, 137, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 146, 150, 165, 169, 170, 172, 173, 175, 189

E

Educación agrícola 179, 183, 185, 186, 187, 190

Eimeria infection 38, 62, 63, 67

Emprendimiento 103, 181

Enterprise 4.0 192, 193

F

Family farming 193, 194, 198, 201, 203, 207

Fingerlings 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11

Frugal development 192, 193, 201, 208

Fruit size 154

G

Geostatistics 163, 176

Growth 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 42, 46, 61, 154, 209

H

Humus de lombriz 102, 103, 105, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123

I

Intervalo equivalente 68, 70, 73

Intervalo geométrico 68, 70

Intervalos de progresión 68, 73

Intervalos iguales 68, 70, 73, 76, 77, 81, 82

K

Kriging 163, 164, 165, 172, 173, 174, 175, 176, 178

M

Management zones 163, 164, 176

Marphysa 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26

O

Oryza sativa 163, 177, 178

P

Parasitic disease management 38

Phytoclimatology 86

Pinus sylvestris 86, 87, 88, 95, 98, 100

Plagas y enfermedades 125, 126, 181, 190

Plant-origin protein 2, 9

Polychaetes 13, 14, 15, 17, 20, 24, 25, 26, 27

R

Rainbow trout 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Renta de tierra y agua 125

Response surface 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161

Rol del ingeniero agrónomo 179

Rupturas naturales 68, 70, 73, 76

S

Salud ambiental 28

Sheep farming 38, 43, 48

Sheep health 38, 59

Sostenibilidad 103, 121, 132, 187, 188, 189

Spatial analysis 84, 163

Suitability 86, 87, 89, 90, 91, 93, 95, 96, 97, 98, 142, 178

Survival 1, 2, 5, 6, 18, 22, 23, 24, 25, 26, 39, 51, 100

T

Tecnología de producción 125

Toltrazuril treatment 38

V

Versatility 86, 97, 98, 99, 100

Vulnerability 84, 86, 99, 101



EDITORA
ARTEMIS

2025