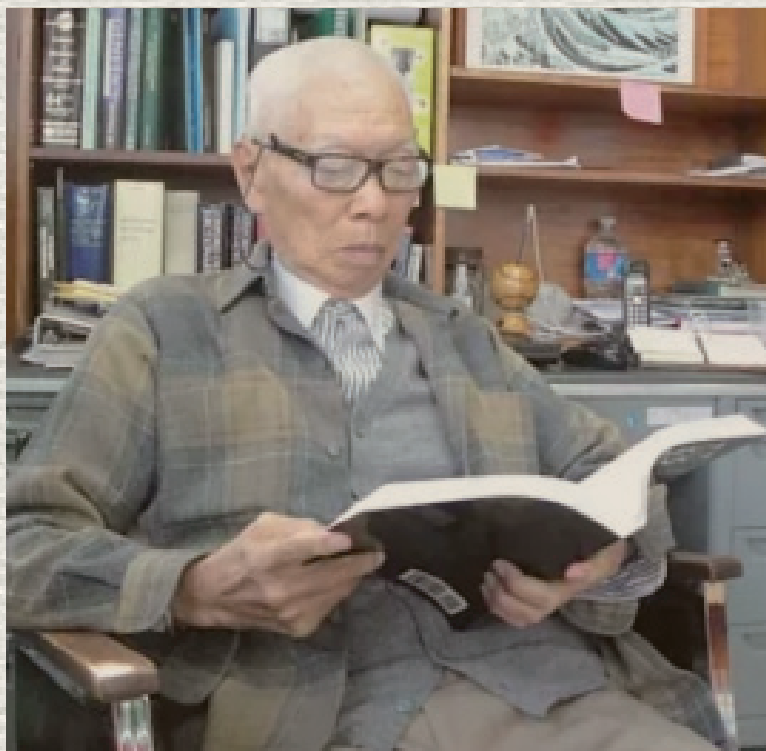


Agrociencia

Volumen 56, Número 2

16 de febrero - 31 de marzo, 2022



Dr. Josué Kohashi Shibata
Investigador Nacional Emérito

DIRECTORIO

DIRECTOR DE AGROCIENCIA

Said Infante Gil

DIRECTOR ADJUNTO DE AGROCIENCIA

Fernando Carlos Gómez Merino

SUBDIRECTORA DE AGROCIENCIA

Ana Rita Román Jiménez

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

Roger Austin (**Inglaterra**)

José Sarukhán Kermez (**México**)

Barry C. Arnold (**EUA**)

COMITÉ ASESOR EDITORIAL INTERNO

Jorge Alvarado López

Jorge D. Etchevers Barra

Víctor A. González Hernández

Leopoldo E. Mendoza Onofre

José A. Villaseñor Alva

RESPONSABLES DE LA EDICIÓN

Said Infante Gil

Fernando Carlos Gómez Merino

Ana Rita Román Jiménez

FORMACIÓN, DISEÑO Y MAQUETACIÓN

L. Brenda Espejel Lagunas

TRADUCTORES

Inés Enriquez

Elena Preciado Gutiérrez

Joel Castillo González

Nicolas Crossa

COSECHADOR DE METADATOS

Moises Quintana Arévalo

APOYO

Belem M. Villegas Contreras

Yolanda Fermoso Meraz

DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS, **Volumen 56, número 2, 16 de febrero - 31 de marzo, 2022**, Agrociencia es una publicación sesquimensual editada por el Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP 56230. Tel. 5959284427. www.colpos.mx. Editor responsable: **Dr. Said Infante Gil**. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2021-031913431800-203. ISSN: 1405-3195. eISSN: 2521-9766, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dr. Said Infante Gil. Fecha de última modificación, **27 de abril del 2022**.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Toda correspondencia (información de suscripciones, ventas, publicidad, contribuciones de autores, etc.) deberá dirigirse a:

~~~~~  
Oficinas Centrales:

#### DIRECTOR DE AGROCIENCIA

Guerrero #9, Esquina Avenida Hidalgo.

56220. San Luis Huexotla. Texcoco, Estado de México

Apartado Postal 56

56230, Suc. Chapingo, Estado de México

Teléfono: 595 92 84427

[agrociencia@colpos.mx](mailto:agrociencia@colpos.mx)

<http://www.colpos.mx/agrocien/agrociencia.htm>  
~~~~~

Aviso: Los nombres comerciales citados en los artículos, notas o ensayos, de ninguna manera implica patrocinio por parte de Agrociencia, ni crítica alguna a otros productos similares.

Portada: Dr. Josué Kohashi Shibata



AGRICULTURA

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

CONTENTS ❖ CONTENIDO

Volumen 56	16 de febrero - 31 de marzo, 2022	Número 2
------------	-----------------------------------	----------

Biotechnology ⇌ Biotecnología

- CHEMICAL COMPOSITION OF PEAR CACTUS MUCILAGE AT DIFFERENT MATURITY STAGES ⇌
 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MUCÍLAGO DE NOPAL EN DIFERENTES ETAPAS DE MADUREZ
 Silvia Viridiana **Vargas-Solano**, Francisco **Rodríguez-González**, Rita **Martínez-Velarde**, Roberto **Campos-Mendiola**, Marco Antonio **Hurtado-Salgado**, Jonathan **Muthuswamy Ponniah**..... 126

Food Science ⇌ Ciencia de los Alimentos

- EFFECT OF NaCl CONCENTRATION ON THE PRODUCTION OF *Arthrospira maxima* CULTIVATED IN
 THE HUMID TROPICS ⇌ EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE NaCl EN LA PRODUCCIÓN DE
Arthrospira maxima CULTIVADA EN EL TRÓPICO HÚMEDO
 Baruc **Fernández-Corte**, Aleida Selene **Hernández-Cázares**, Fernando Carlos **Gómez-Merino**, Ramón de
Cangas, Mónica **Rodríguez-Palacio**, Oscar **García-Gómez**, María Antonieta **Ríos-Corripio**..... 151

Animal Science ⇌ Ciencia Pecuaria

- ILEAL APPARENT AND STANDARDIZED AMINO ACID DIGESTIBILITY OF SOYBEAN AND COLZA
 MEAL IN DIETS FOR FINISHING PIGS ⇌ DIGESTIBILIDAD ILEAL APARENTE Y ESTANDARIZA-
 DA DE AMINOÁCIDOS EN DIETAS CON PASTAS DE SOYA Y CANOLA PARA CERDOS EN FINAL-
 IZACIÓN
 Juan Edrei **Sánchez-Torres**, Ignacio Arturo **Domínguez-Vara**, Luis **Castro-Bárcena**, Jorge Luis **Yañez-
 Hernández**, Miguel **Cervantes-Ramírez**, Ernesto **Morales-Almaraz**, José Luis **Bórquez-Gastelum**, Daniel
Trujillo-Gutierrez..... 181

Crop Science ⇌ Fitociencia

- SODIUM CHLORIDE ON BIOACTIVE COMPOUNDS OF EGGPLANT (*Solanum melongena* L.) GROWN
 IN HYDROPONICS UNDER TWO PROTECTED STRUCTURES ⇌ CLORURO DE SODIO EN COM-
 PUESTOS BIOACTIVOS DE BERENJENA (*Solanum melongena* L.) CULTIVADA EN HIDROPONÍA BAJO
 DOS ESTRUCTURAS PROTEGIDAS
 Ana Yesenia **Lara-Izaguirre**, Ángel Natanael **Rojas-Velázquez**, Irán **Alia-Tejagal**, Jorge Alonso **Alcalá-
 Jáuregui** 207

Applied Mathematics-Statistics-Computer Science ⇌ Matemáticas Aplicadas, Estadística y Computación

- PREDICTION OF SOCIAL LAG IN MEXICO: A MACHINE LEARNING APPROACH FROM ECONOMIC
 UNIT DATA ⇌ PREDICCIÓN DEL REZAGO SOCIAL EN MÉXICO: UN ENFOQUE DE APRENDIZAJE
 AUTOMÁTICO A PARTIR DE DATOS DE UNIDADES ECONÓMICAS
 Pablo Rodrigo **Ávila-Solís**, Juan Manuel **González-Camacho**, Delfino **Vargas-Chanes**, Paulino **Peréz-
 Rodríguez**..... 233

Plant Protection ⇌ Protección Vegetal

- HOLISTIC RISK INDEX FOR DECISION-MAKING IN MANAGEMENT OF RUST *Hemileia vastatrix* IN COFFEE PLANTATIONS IN HONDURAS ⇌ ÍNDICE HOLÍSTICO DE RIESGO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL MANEJO DE LA ROYA (*Hemileia vastatrix*) EN CAFETALES DE HONDURAS
Carolina **Reyes-Robles**, Alejandro **Moreno-Reséndez**, José Luis **Reyes-Carrillo**, Juan Francisco **Barrera-Gaytán**, Ángel **Trejo-Sosa**, Juan Rafael **López-Dubón** 264

Natural Renewable Resources ⇌ Recursos Naturales Renovables

- In vitro* MOLECULAR IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF *Pleurotus* spp. STRAINS IN GUANAJUATO, MEXICO ⇌ IDENTIFICACIÓN MOLECULAR Y CARACTERIZACIÓN *in vitro* DE *Pleurotus* spp. EN GUANAJUATO, MEXICO
Socorro **Morales-Flores**, Jonathan **Cepeda-Negrete**, Gerardo **Mata-Montes de Oca**, Arturo **Ángel-Hernández**, Jesús **Hernández-Ruiz**, Jorge Eric **Ruiz-Nieto** 294

Socioeconomics ⇌ Socioeconomía

- GLOBAL FOOD SECURITY AND SOVEREIGNTY IMPACTED BY SARS-CoV-2 PANDEMIC ⇌ SEGURIDAD Y SOBERANÍA ALIMENTARIA MUNDIAL AFECTADAS POR LA PANDEMIA DE SARS-CoV-2
Magdalena **Mendoza-Sánchez**, Alejandro **Espíndola-Ánimas**, María de Jesús **Mendoza-Sánchez** 316
- PREFERENCES OF WINE CONSUMERS FROM DOLORES HIDALGO, GUANAJUATO: A CHOICE EXPERIMENT APPROACH ⇌ PREFERENCIAS DE LOS CONSUMIDORES DE VINO DE DOLORES HIDALGO, GUANAJUATO: UN ENFOQUE DE EXPERIMENTOS DE ELECCIÓN
Araceli **González-Juárez**, Juan **Hernández-Ortíz**, Miguel Ángel **Martínez-Damián**, Enrique **Melo-Guerrero**, Ramón **Valdivia-Alcalá**, Juan Oswaldo **Cervantes-Luna**, Fermín **Sandoval-Romero** 359
- CHARACTERISTICS, ROLES, AND FUNCTIONS OF THE INNOVATION AGENTS IN THE AGRI-FOOD SECTOR ⇌ CARACTERÍSTICAS, ROLES Y FUNCIONES DE LOS AGENTES DE INNOVACIÓN EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO
Juan Manuel **Vargas-Canales**, Sergio **Orozco-Cirilo**, Sergio Ernesto **Medina-Cuéllar**, Joaquín **Hutzilihuitl Camacho-Vera** 383

CHEMICAL COMPOSITION OF PEAR CACTUS MUCILAGE AT DIFFERENT MATURITY STAGES

Silvia Viridiana Vargas-Solano¹, Francisco Rodríguez-González^{1*}, Rita Martínez-Velarde¹, Roberto Campos-Mendiola¹, Marco Antonio Hurtado-Salgado¹, Jonathan Muthuswamy Ponniah²

¹ Instituto Politécnico Nacional (IPN). Centro de Desarrollo de Productos Bióticos (CEPROBI). Carretera Yautepec-Jojutla km 6, Calle CEPROBI, No. 8, Colonia San Isidro, Yautepec, Morelos, Mexico. C. P. 62731.

² Instituto Politécnico Nacional (IPN). Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD). Calle 30 de junio de 1520 s/n, Colonia Barrio la Laguna Ticomán, Gustavo A. Madero, Mexico City, Mexico. C. P. 07340.

* Corresponding author: frrodriguez@ipn.mx

ABSTRACT

The pear cactus (nopal, *Opuntia ficus-indica*) mucilage is a hydrocolloid that it helps to regulate the cellular water content in the plant for survive during long periods drought, is composed mainly of neutral and acidic sugars and the concentration of those can change due to the maturity stages of the cladodes or pear cactus. For this reason, the hypothesis of this work was that the maturity stages of pear cactus mucilage produce change in the chemical composition and the aim of this work was to characterize pear cactus mucilage of three different stages of maturity, namely, tender, young, mature according to their proximal chemical composition, analysis of functional groups, identification, and quantification of sugars as well as the elemental microanalysis of the respective pear cactus. The results showed that the mature pear cactus mucilage exhibited the highest content of ash, fiber, and total sugars, with 34.8, 47.5 and 14.32 g 100 g⁻¹, respectively, and uronic acid with 34.5 %, with respect to the other mucilage. The functional groups identified in the three mucilage (O-H, C-H of methylene, C=O of carboxylic, C-N of amines, and C-O bonds of primary and secondary alcohol) were same, however did show differences in the band intensity between the three mucilage. Chemical elements (minerals) such as potassium, magnesium, calcium, phosphorus, sulfur, silicon, and chlorine were identified in the different pear cactus samples. The content of total sugars, fiber, ash, calcium crystals and uronic acids showed an increase with the increase in the maturity stage of the pear cactus. The results generated could be a potential and relevant for its application in removal of heavy metals present in bodies of water.

Keywords: *Opuntia ficus-indica*, pear cactus, mucilage, maturity stages, chemical composition.

Citation: Vargas-Solano SV, Rodríguez-González F, Martínez-Velarde R, Campos-Mendiola R, Hurtado-Salgado MA, Muthuswamy Ponniah J. 2022. Chemical composition of pear cactus mucilage at different maturity stages. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2726>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: June 11, 2021
Approved: March 07, 2022.
Estimated publication date:
March 09, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 126-150.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCTION

Pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) is a plant of the Cactaceae family, cultivated in arid and semi-arid zones and called nopal in Mexico (Contreras *et al.*, 2015), the plant has Crassulacean acid metabolism (CAM), which allows it to be resistant to drought during long periods and growing in arid and semi-arid regions by storing water in

the parenchyma of their cladodes (Nuzhyna *et al.*, 2018). For it produce mucilage in their interior (specialized cells) which secrete it into apoplast where it helps to regulate the cellular water content in the plant. Other possible function of mucilage can be relationated with the Ca^{2+} (Goycoolea and Cardenas 2003). On the other hand, the cladodes or pseudo stems in the adulthood stage accumulate calcium in the form of drusen (calcium oxalate crystals), which helps the flow of calcium inside them (Contreras *et al.*, 2015), whereas in the young stage are active for synthesis of proteins, lipids, polysaccharides, and oxalic acid.

The mucilage from pear cactus is a hydrocolloid composed mainly of different sugars such as arabinose, galactose, rhamnose, xylose, galacturonic acid which are present in polymeric form as polygalacturonic acid and others pectic compounds. The presence of polymeric compounds is formed by two or more sugars with different molecular weights varying from 2.3×10^4 to 13×10^6 g mol⁻¹ (Medina-Torres *et al.*, 2013). Moreover, the chemical composition of the mucilage varies depending on factors such as temperature, season, soil, region, light/dark periods, and availability of water as well as age of maturation (Contreras *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2010). Previous studies by different authors with reference to the chemical composition and maturity stage of pear cactus are very limited. The hypothesis of this work was that the maturity stages of pear cactus mucilage produce change in the chemical composition. To test it, the aim was characterize the pear cactus mucilage during the three different stages of maturity (tender, young and mature), which is done based on chemical composition, analysis of functional groups, identification, and quantification of sugars as well as the elemental microanalysis of the respective pear cactus.

MATERIALS AND METHODS

Cladodes from *Opuntia ficus-indica* were cultivated and harvested by producers in a crop of field of Tepoztlan, Morelos, Mexico (18°58'29.3"N; 99°08'10.1"W). The selection and collection of the cladodes was random from different plants in March 2019, during early morning (06:00 am) for not affect the acidity and the taste produced by the malic acid and other acids on the cladode (during the night) and that are reduced in the day due to its metabolic cycle (formation of other compounds), the cladodes were divided in three stages [average in days – tender (T): 20; young (Y): 40; mature (M): 600]. Thorns in the samples were removed with the help of a stainless-steel knife and cladodes were brushed and washed with distilled water and liquid soap to remove all external particles. Extraction of mucilage from different samples of pear cactus was carried out following the method used by Rivera-Corona *et al.* (2014) which was modified during the extraction and purification process. The modification from the previous method was from 1:7 (pear cactus: water) to 1:1 (pear cactus: deionized water) during the extraction, and the purification stage was opted out. The cleaned-up pear cactus was sliced and agitated constantly at 40 °C for 4 h during the leaching process. The leached product was filtered using a 425 µm mesh and stored at 4 °C for 14 h. This was subsequently dried by lyophilization kit (Virtis Consol 25 SL, EUA) at -25 °C with high vacuum for 7 d approximately and the powders were stored in hermetic containers.

Chemical analysis of pear cactus mucilage

Moisture content, ashes, proteins, lipids, and total dietary fiber of dried mucilage (T, Y and M) were determined using the oven drying method (14.004), incineration (32.10), digestion and distillation by the Kjeldahl method (14.026). Likewise, extraction of lipids was done based on Goldfish method (70.56) and enzymatic-gravimetric method (992.16) respectively (AOAC, 2010). In addition, the total sugar content was determined using the phenol-sulfuric colorimetric method (Feitosa *et al.*, 2021).

Fourier Transform Infrared Spectroscopy analysis (FTIR)

The FTIR spectra of the different mucilage powder samples (T, Y and M) were identified to determine the functional groups in an IR-Affinity 1 spectrophotometer (Shimadzu, Japan) which is operated within a range of 600-4000 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} using an ATR plate.

Identification of sugars

The identification of sugars was carried out by High-performance thin layer chromatography HPTLC (Singh *et al.*, 2021). Three microliters of the standard solutions of arabinose, fructose, galactose, glucose, sucrose, rhamnose, xylose, galacturonic acid, glucuronic acid and polygalacturonic acid (3 mg mL^{-1} of deionized water) (Purity $\geq 98\%$, Sigma-Aldrich, Germany) and 15 μL of the mucilage solutions (6 mg mL^{-1}) was applied semi-automatically (CAMAG Linomat 5, Switzerland) to a silica gel plate F_{254} with aluminum support (20 $\text{cm} \times 10 \text{ cm}$) (Merck, Germany). The plate was developed twice with butanol-propanol-water (3:12:4 v/v/v) and then heated at 180 $^{\circ}\text{C}$ for 20 min, subsequently derivatized with diphenylamine-aniline-acetone-phosphoric acid (1:1:40:7.5 w/v/v/v) and heated for 5 min at 120 $^{\circ}\text{C}$, finally was exposed to visible light and UV (wavelength of 254 and 366 nm) to obtain images by means of Visualizer 2 (CAMAG, Switzerland). The sugars identified by HPTLC of T, Y and M mucilage solutions were detected with the retention factor (R_f) of the bands present in the standard solutions.

Quantification of sugars

The quantification of the water-soluble sugars of the mucilage studied was performed by HPLC, using LC-MS 2020 (Shimadzu, Japan). It is controlled by the CBM-20A system with 2 dual LC-20AD pumps, DGU-20A degasser, SIL-20AC auto-sampler, CTO-20A column furnace, RID-10A refractive index detector. The Prevail™ carbohydrates ES 5u column (250 $\times$ 4.6 mm) (Alltech, EUA) was operated at 30 $^{\circ}\text{C}$ with acetonitrile-ultrapure water (8:2 v/v) as the mobile phase in an isocratic elution with a flow rate of 1 mL min^{-1} to sample volume of 20 μL (software lab solution version 5.0). The detection of these sugars was done at a wavelength of 195 nm and was quantified using a standard curve of arabinose, fructose, galactose, glucose, rhamnose and xylose.

Quantification of uronic acids

The quantification of uronic acid of the different mucilage in solution (2 mg mL^{-1} of distilled water) was analyzed by the colorimetric method with carbazole (Feitosa *et al.*,

2021). Then 100 μL of mucilage in solution was mixed with 6 mL of concentrated H_2SO_4 in a cold and was placed in a boiling water bath for 10 min. The mixture was cooled to room temperature and then 0.4 mL of alcoholic carbazole solution (0.1 %) was added. The absorbance was measured in a UV-160A spectrophotometer (Shimadzu, Japan) at 530 nm (after 30 min) and the concentration was determined with a calibration curve used a galacturonic acid standard (solutions of 0.25 to 1 mg mL^{-1} distilled water) and was made an adjustment of linear regression model with R^2 of 0.998.

Scanning Electron Microscopy (SEM) and micro elemental analysis

A microanalysis of the minerals was carried out in different sections of the fresh pear cactus studied (T, Y and M). The samples were observed in a scanning electron microscope (CARL ZEISS EVO LS 10, Germany) and analyzed with a scattered energy detector (EDX) coupled to the microscope to determine the elemental composition.

Statistical analysis

The experiments of chemical composition, quantification of sugars as well as quantification of uronic acids were carried out in triplicate, for which the results of these are expressed in mean values with a standard deviation $\pm$. Statistical analyzes were performed using SigmaPlot version 14.0 (Systat Software Inc., 2017). The mean values of the variables studied in the different groups were compared using a one-way analysis of variance followed by a Tukey's multiple range tests assuming a significant difference at $p \leq 0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

Chemical composition of mucilage

Table 1 shows the chemical composition analysis of the mucilage extracted from the *O. ficus-indica* of different maturity stages of growth used in this study were coded as tender (T), young (Y) and mature (M) mucilage. The moisture content in the three mucilage types varied from 4.2 to 5.9 $\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ with differences between M and the other mucilage, these results are close with studies conducted on cactus mucilage (Rivera-

Table 1. Chemical composition of pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage of different maturity stages.

Composition ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$)	Tender	Young	Mature
Moisture [†]	5.9 $\pm$ 0.4 a	5.3 $\pm$ 0.2 a	4.2 $\pm$ 0.1 b
Protein [†]	15.0 $\pm$ 0.3 a	14.7 $\pm$ 0.2 a	10.1 $\pm$ 0.1 b
Fat [†]	4.4 $\pm$ 0.2 a	4.1 $\pm$ 0.1 a	2.3 $\pm$ 0.1 b
Ash [†]	29.8 $\pm$ 1.3 b	30.1 $\pm$ 0.8 b	34.8 $\pm$ 0.6 a
Total sugars [†]	45.4 $\pm$ 0.3 b	45.3 $\pm$ 0.3 b	47.5 $\pm$ 0.5 a
Fiber [‡]	8.61 $\pm$ 0.1 c	8.97 $\pm$ 0.1 b	13.7 $\pm$ 0.1 a

[†]Mean $\pm$ standard deviation ($n = 3$). [‡]Mean $\pm$ standard deviation ($n = 2$). Means in a row with different letters indicate significant difference ($p \leq 0.05$).

Corona *et al.*, 2014). This low moisture content is due to the drying process of the samples. However, in none of these cases there was the total elimination of the water due the water bound to the material produces interactions between the dipole charges of the water and the negative charges of the functional groups of the macromolecules present in the mucilage (Goycoolea and Cardenas 2003).

The highest protein content of mucilage was observed in T and Y (15 g 100 g⁻¹ and 14.7 g 100 g⁻¹, respectively), which showed difference with the M mucilage. Likewise, the same behavior was observed in the fat content for T and Y of 4.4 g 100 g⁻¹ and 4.1 g 100 g⁻¹, respectively. The content of proteins decreased as a function of development due to the variations attributed to the thickening of the cuticle and to the parenchyma expansion in matured pear cactus (Astello-García *et al.*, 2015).

The total sugar content observed in mucilage in our study was 45.4 g 100 g⁻¹ at 47.5 g 100 g⁻¹, with differences between the mature mucilage and the other two mucilage ($p \leq 0.05$). These results are consistent with the necessary requirements for the development and protection of the pear cactus during the dry season (Carpita *et al.*, 2015). Moreover, it was observed that the total sugars are present as the major component in the mucilage with no regard to the age of maturation, which is mainly due to the presence of complex neutral and acidic sugars that form the hydrocolloid. In addition, with reference to the fiber content, the same behavior was observed that sugars by increasing as a function of the age of maturation were different between the T and Y with respect to M mucilage.

The ash content in M mucilage was the highest (34.8 g 100 g⁻¹), indicating a clear difference with the Y and T mucilage (30.1 g 100 g⁻¹ and 29.8 g 100 g⁻¹). The ash content in the mucilage was mainly hard minerals and was a tendency to increase as a function of the maturity stage as reported by Messina *et al.* (2021) for fresh mucilage of *O. ficus-indica* during the seasonal growth period (dormancy to post-fruiting); however, had a lower ash content than the obtained for the mucilage studied.

FTIR analysis

The FTIR spectrum of the three mucilage studied showed spectral bands between the region of 3270-3217 cm⁻¹ (Figure 1), which are due to the stretching (extension) of the O-H bond (hydroxyl group). However, in mature stage mucilage, there is a greater intensity of these bands compared to young and tender mucilage. A similar result is observed in the bands present in the 2932-2926 cm⁻¹ region, which are related to the asymmetric stretching (extension) of the C-H bond of the methylene group (-CH₂). Likewise, the bands observed in the regions of 1714-1709 cm⁻¹, 1599-1595 cm⁻¹ and 1400 cm⁻¹ are related to the vibration of the stretching (extension) of the C=O of the carboxylic acid (RCOOH), these bands showed an intensity higher in the mature mucilage with respect to T and Y mucilages.

Bands detected in 1328-1312 cm⁻¹ and 1256-1250 cm⁻¹ correspond to C-N stretch of amines, were a higher intensity in the bands of T mucilage, while bands identified in 1080 cm⁻¹ and 1040 cm⁻¹ correspond to the vibrations of the stretching (extension) of

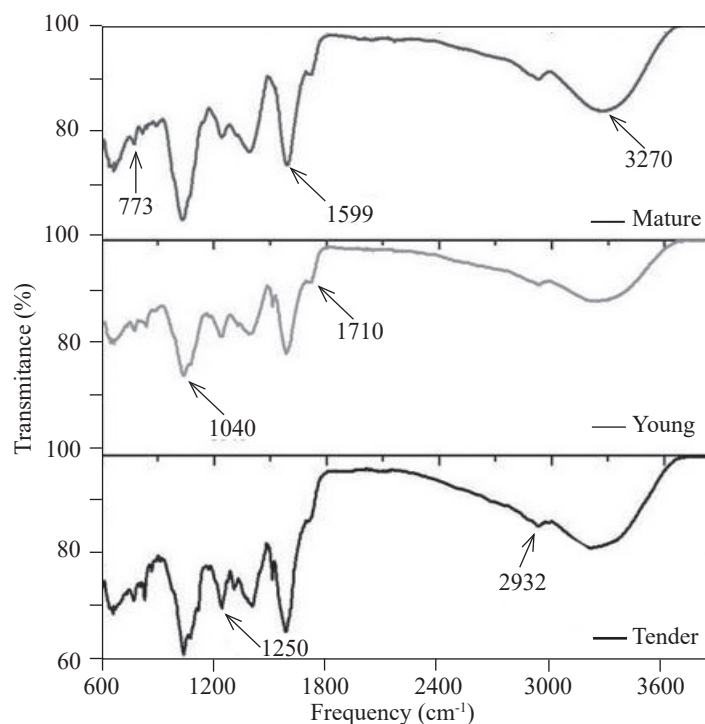


Figure 1. FT-IR spectra of tender, young and mature mucilage of pear cactus (*Opuntia ficus-indica*).

the C-O bonds of primary and secondary alcohol of the pyranose ring were a higher intensity in the bands of mature mucilage, and bands observed in the region of 916-773 cm^{-1} are due to C-H out of plane bend and to monosubstitution (phenyl) on phenolics compounds. The groups identified in this study (O-H, C-H, C=O, C-N, C-O) were also observed by Rivera-Corona *et al.* (2014) for lyophilized pear cactus mucilage, powders and gels of mixtures sorghum starch-mucilage; they observed an increase in the intensity of the bands by increasing the concentration of mucilage in the mixtures, this result was attributed to the increase in functional groups due to the increase in the concentration of mucilage. Therefore, a greater intensity of the bands of the functional groups C=O, C-H and O-H of the mature mucilage could be due to the higher content of uronic compounds.

Identification of sugars

The T, Y and M mucilage by HPTLC had glucose and fructose in their composition (Figure 2), as expected because these sugars are generated by the biochemical reactions of the plant, derived from the metabolic pathway called glycolysis (Carpita *et al.*, 2015). In addition, xylose, galacturonic acid and polygalacturonic acid were also identified in the mucilage. This last compound was detected near the application line, that is, it interacted with the silica gel on the plate. This result indicates that the compound is

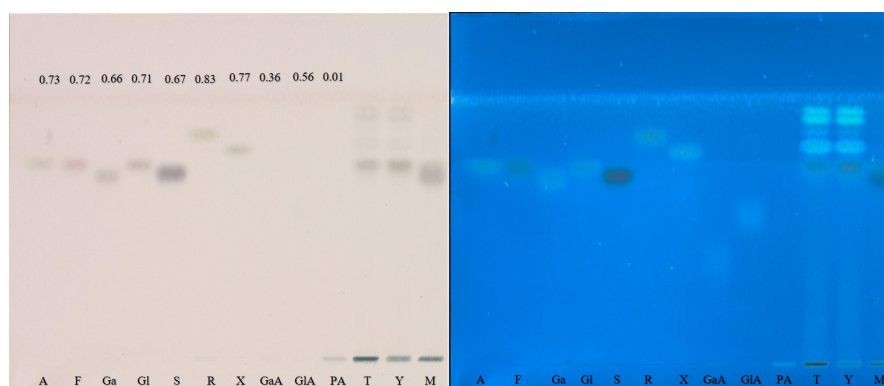


Figure 2. Typical HPTLC chromatograms of sugars of pear cactus mucilage of different maturity stages. Arabinose (A), fructose (F), galactose (Ga), glucose (Gl), sucrose (S), rhamnose (R), xylose (X), galacturonic acid (GaA), glucuronic acid (GLA) and polygalacturonic acid (PA), tender (T), young (Y) and mature (M).

polar due to the high content of hydroxyl groups (-OH) that it presents in its molecules. Likewise, in the M mucilage was identified galactose while rhamnose was detected for Y and T mucilage.

Quantification of sugars

The identification of the different sugars was done by comparing the retention time of the standards with those of the mucilage studied (T, Y and M) and quantified using the standard curve of the sugars; the results of the quantification of sugars of the three mucilages are shown in Figure 3. The highest content of arabinose, glucose and fructose was observed in Y mucilage with 0.55, 168.3 and 4.2 mg g⁻¹, respectively, while the first sugars mentioned was not detected in T mucilage (Figure 3). The presence and variations in the concentration of glucose and arabinose in the different mucilage is consistent with the reported by Ribeiro *et al.* (2010) for a fraction of high weight of peeled pear cactus aged between six and twelve months, they obtained different concentrations of the sugars and compounds of different molecular weight.

However, the highest content of galactose, rhamnose and xylose was present in the T mucilage with 86.4, 84.9 and 193.8 mg g⁻¹ respectively, indicating differences with Y and M mucilage, the decreasing of galactose with the maturity stages could be attributed to the oxidation of C6 for the formation of galacturonic acid. The higher galactose content in Y mucilage and decreasing in mature mucilage was reported for *O. ficus-indica* of the Giant palm variety by Ribeiro *et al.* (2010), it was also observed that the T mucilage had the highest content of neutral sugars and these compounds decreased as a function of the maturation age. Therefore, variations in the content of these sugars in pear cactus mucilage at different maturation ages were due to the variety and requirements of the plant for the formation of other primary or secondary metabolites necessary for the maturation stages of the cactus. For example, the reduction of the

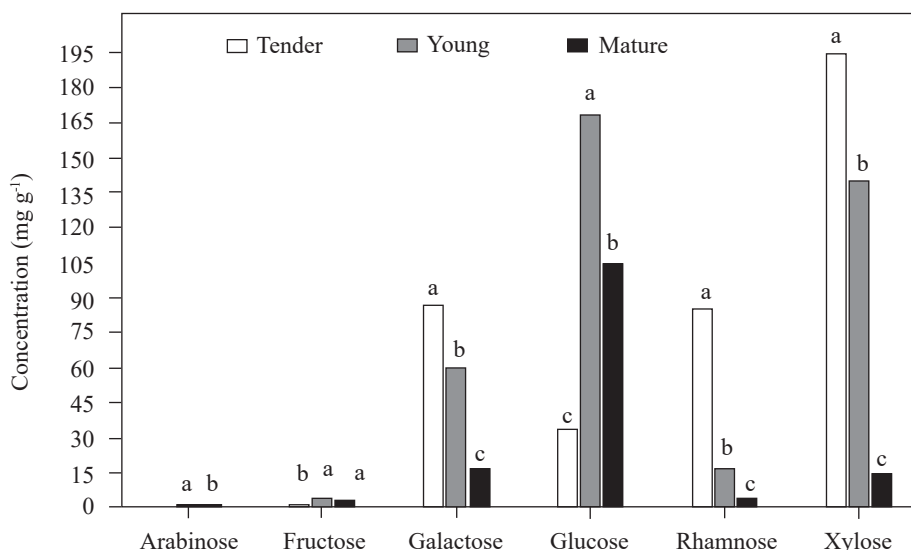


Figure 3. Concentration of sugars of mucilage of pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) at different maturity stages. Means in a row with different letters indicate statistical difference ($p \leq 0.05$).

simple sugars content in the M mucilage could be due to the metabolism in the plant for reproduction, which after 360 d of maturation is specialized in the production of flowers and fruits. The cladodes with more than 600 d of maturation often form and develop new cladodes in the plant (Nuzhyna *et al.*, 2018). According to the results of Di Lorenzo *et al.* (2017) for the case of pear cactus mucilage, these sugars form polymeric components of high molecular weight, a linear one called β -(1 $\rightarrow$ 4)-galactans (galactopyranose) and a branched one called xyloarabinane composed of α -(1 $\rightarrow$ 5) Arabinofuranosyl skeleton linked with additional arabinofuranosyl residues and the presence of xylose units as protecting groups for the plant.

Uronic acids

The content of uronic acids is higher in the M mucilage (345.8 mg g⁻¹) and it showed differences in the content of these compounds with Y and T mucilage (112.9 and 100.7 mg g⁻¹, respectively). In addition, the concentration of uronic acids was quantified in the mucilage which increases with the maturity stages of the pear cactus. On the other hand, the uronic acid content for the three mucilage studied was between the interval for the pear cactus mucilage purified with isopropanol (11.64 %) and total pectin fraction (60.66 %) (Bayar *et al.*, 2016). The result of the increase in the uronic acids content with maturity stage is like the reported for the purified mucilage of young and mature age of different *O. ficus-indica* variety (Ribeiro *et al.*, 2010).

The increasing tendency in the uronic acids content and decreasing in the content of galactose, rhamnose and xylose as a function of the maturity stage of *O. ficus-indica* can be related to the requirements of the plant for other functions. For example, in the

synthesis of sugars forming polysaccharides of rhamnogalacturonanes type that form the mucilaginous substances or also called pectics in the primary cell wall (Vriesmann and de Oliveira, 2017), have the main function of retaining or storing the water to survive in drought conditions for long periods (Bayar *et al.*, 2016).

However, after a short, elapsed period the developed plant has other requirements (after 37 d) like reducing the synthesis of pectin substances, the increasing in the concentration of acidic sugars for the formation of hemicellulose (composed of neutral and acidic sugars). Those are deposited together with the cellulose and lignin in the secondary cell wall, generating a thickening of the wall that results in greater support and rigidity in the mature plant (Nuzhyna *et al.*, 2018).

SEM and elemental microanalysis

The images obtained with SEM of the pear cactus in different maturation stages showed that the crystals are immersed in the interior of the cactus samples, and they present a cubic shape (Figure 4 a-c). The size of the crystals varies between 1.6 to 5.8 μm and it was mainly observed in the M pear cactus samples; followed by the Y and finally the T (Figure 4c). Based on the above differences in crystals identified as calcium carbonate salt (CaCO_3) (Contreras *et al.*, 2015), it is considered that the quantity of crystals increased as a function of the maturity age of this pear cactus and was related to the increase of ash content. In addition, it can be observed the morphology of fragments of calcium oxalate crystals and structures formed by the union of drusen that corresponds to a star or rosette shape with sharp peaks which have sizes between 10 and 30 μm and decreased as the cactus matures.

The decrease in oxalates and the increase in CaCO_3 suggests that the plant had a bidirectional calcium regulation mechanism. Which consisted in the fragmentation of druses by enzymatic action when the plant needed carbon dioxide or calcium available. This process was stopped when the plant had an excess of calcium (CaCO_3) and these crystals were added to generate again oxalates as a reserve of calcium. Therefore, the increase of the crystals of cubic shape and the reduction of druses in plants with around 100 d of maturation suggest that this behavior is due to the plant biochemical process for the opening and closing events of the stomata, which

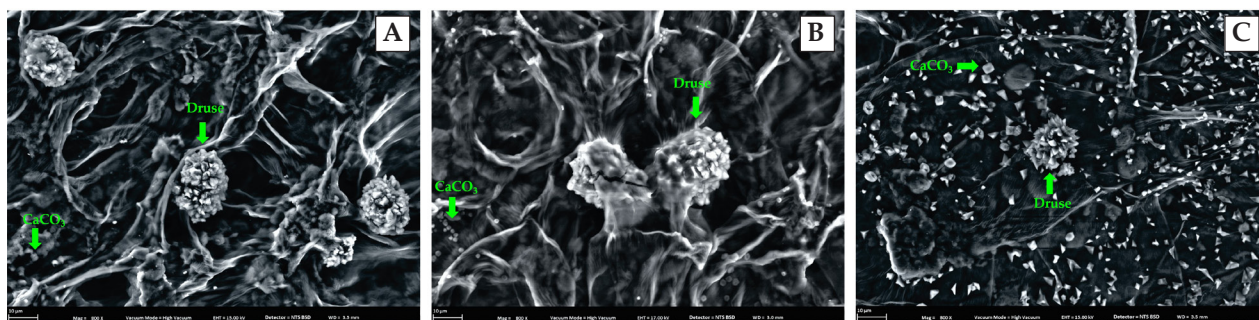


Figure 4. SEM images of calcium structures of pear cactus (*Opuntia ficus-indica*). A) Tender pear cactus; B) Young pear cactus; C) Mature pear cactus.

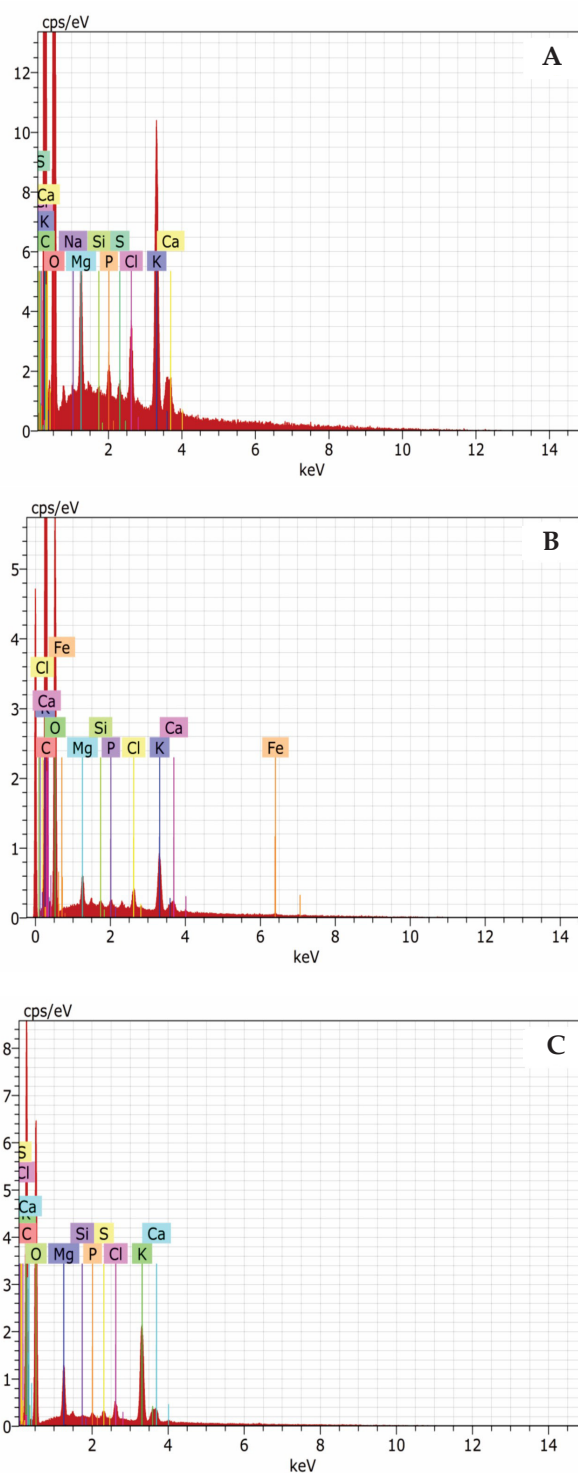


Figure 5. Elemental microanalyses of pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) at different maturity stages. A) Tender pear cactus; B) Young pear cactus; C) Mature pear cactus.

must be closed during the day for avoiding gas exchange and water loss, due to the Crassulacean acid metabolism (CAM) (Nuzhyna *et al.*, 2018).

The images of the elemental microanalysis of cactus samples at different maturity stages confirmed the presence of potassium, magnesium, calcium, phosphorus, sulfur, silicon and chlorine (T, Y and M pear cactus in Figure 5a, b and c, respectively). In addition, presence of sodium in the T pear cactus and iron in the Y pear cactus is also observed. These identified elements, except sulfur, silicon and chlorine are the main minerals identified in the analyzed *Opuntia* species (*O. ficus-indica*, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha*) (Astello-García *et al.*, 2015). The presence of calcium in pear cactus is related with the calcium oxalates observed in figure 4 and which act as a response to various abiotic and biotic factors, while magnesium is an essential element for the composition of chlorophyll, which is essential for the photosynthesis process.

CONCLUSIONS

The study of pear cactus mucilage of different maturity stage showed change in the chemical composition, decreasing the protein content, ether extract and sugars such as galactose, rhamnose and xylose, and increasing the content of total sugars, fiber, ash, calcium crystals and uronic acids as a function of maturity stages (tender mucilage to mature mucilage) due to the requirements biochemical of the plant.

The mucilage extracted from mature pear cactus exhibited the higher content of galacturonic acids and was confirmed with the FT-IR technique, which showed qualitatively with the intensity in the bands that the mature mucilage contained more functional groups related to uronic acids.

The element potassium, magnesium, and calcium were identified in prickly pear cactus *O. ficus-indica*.

The study the composition of pear cactus mucilage at different maturity stages is important to exploit its use in the industry according to the properties given by its compounds and required in each product.

ACKNOWLEDGMENTS

To Secretaría de Investigación y Posgrado of Instituto Politécnico Nacional (IPN), for the financial support of the research allowed to F. Rodríguez-González through the projects SIP-IPN No. 20210224. To Sistema Nacional de Investigadores (SNI) under the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), and COFAA & EDI of IPN, Mexico.

REFERENCES

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2010. Official Methods of analysis. 15th ed. AOAC International: Arlington, VA, USA. 1298 p.
- Astello-García MG, Cervantes I, Nair V, Santos D MS, Reyes-Agüero A, Guéraud F, Negre-Salvayre A, Rossignol M, Cisneros-Zevallos L, Barba de la Rosa AP. 2015. Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis* 43: 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>
- Bayar N, Kriaa M, Kammoun R. 2016. Extraction and characterization of three polysaccharides extracted from *Opuntia ficus indica* cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules* 92: 441–450. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.07.042>

- Carpita N, Ralph CJ, McCann MC. 2015. The cell wall. In: Buchanan BB, Gruissem W, Jones RL. (eds). *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. The American Society of Plant Physiologists. Maryland. pp: 45–110.
- Contreras-Padilla M, Rivera-Muñoz EM, Gutiérrez-Cortez E, del Real-López A, Rodríguez-García ME. 2015. Characterization of crystalline structures in *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Biological Physics* 41: 99–112. <https://doi.org/10.1007/s10867-014-9368-6>
- Di Lorenzo F, Silipo A, Molinaro A, Parrilli M, Schiraldi C, D'Agostino A, Izzo E, Rizza L, Bonina A, Bonina F, Lanzetta R. 2017. The polysaccharide and low molecular weight components of *Opuntia ficus indica* cladodes: Structure and skin repairing properties. *Carbohydrate Polymers* 157: 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.073>
- Feitosa B, Freitas DA, da Silva JNR, Gonçalves M. de Freitas A, Assreuy AM. 2021. Polysaccharide-rich extract of *Caesalpinia ferrea* stem barks attenuates mice acute inflammation induced by zymosan: Oxidative stress modulation. *Journal of Ethnopharmacology* 267: 113501. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113501>.
- Goycoolea FM, Cárdenas A. 2003. Pectins from *Opuntia spp.*: A short Review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 5: 17–29. <https://www.jpacd.org/jpacd/article/view/302/261>
- Medina-Torres L, García-Cruz EE, Calderas F, González-Laredo RF, Sánchez-Olivares G, Gallegos-Infante JA, Rocha-Guzmán NE, Rodríguez-Ramírez J. 2013. Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*). *LWT - Food Science and Technology* 50: 642–650. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.038>
- Messina CM, Arena R, Morghese M, Santulli A, Liguori G, Inglese P. 2021. Seasonal characterization of nutritional and antioxidant properties of *Opuntia ficus-indica* [(L.) Mill.] mucilage. *Food Hydrocolloids* 111: 106398. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106398>
- Nuzhyna N, Baglay K, Golubenko A, Lushchak O. 2018. Anatomically distinct representatives of Cactaceae Juss. family have different response to acute heat shock stress. *Flora*. 242: 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.03.014>
- Ribeiro EM, da Silva NE, de Lima JL, de Brito JZ, Carvalho da Silva MP. 2010. Study of carbohydrates present in the cladodes of *Opuntia ficus-indica* (fodder palm), according to age and season. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 30: 933–939. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000400015>
- Rivera-Corona JL, Rodríguez-González F, Rendón-Villalobos R, García-Hernández E, Solorza-Feria J. 2014. Thermal, structural and rheological properties of sorghum starch with cactus mucilage addition. *LWT - Food Science and Technology* 59: 806–812. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.011>
- Systat Software Inc. 2017. Procedure Guide, SigmaPlot version 14.0 (computer program). Systat Software Inc, San Jose, California.
- Singh RS, Singh T, Singh D, Kennedy JF. 2021. HPTLC-densitometry quantification of fructooligosaccharides from inulin hydrolysate. *International Journal of Biological Macromolecules* 177: 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.116>
- Vriesmann LC, de Oliveira CL. 2017. Cacao pod husks as a source of low-methoxyl, highly acetylated pectins able to gel in acid media. *International Journal of Biological Macromolecules* 101: 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.082>

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MUCÍLAGO DE NOPAL EN DIFERENTES ETAPAS DE MADUREZ

Silvia Viridiana Vargas-Solano¹, Francisco Rodríguez-González^{1*}, Rita Martínez-Velarde¹, Roberto Campos-Mendiola¹, Marco Antonio Hurtado-Salgado¹, Jonathan Muthuswamy Ponniah²

¹ Instituto Politécnico Nacional (IPN). Centro de Desarrollo de Productos Bióticos (CEPROBI). Carretera Yautepec-Jojutla km 6, Calle CEPROBI, No. 8, Colonia San Isidro, Yautepec, Morelos, Mexico. C. P. 62731.

² Instituto Politécnico Nacional (IPN). Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD). Calle 30 de junio de 1520 s/n, Colonia Barrio la Laguna Ticomán, Gustavo A. Madero, Mexico City, Mexico. C. P. 07340.

* Autor para correspondencia: frrodriguezg@ipn.mx

RESUMEN

El mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica*) es un hidrocoloide que ayuda a regular el contenido de agua celular en la planta para sobrevivir durante períodos largos de sequía. Está compuesto principalmente de azúcares neutros y ácidos y la concentración de estos puede cambiar debido a las etapas de madurez de los cladodios o nopales. Por esta razón, la hipótesis de este trabajo fue que los estados de madurez del nopal producen cambios en la composición química del mucílago, y el objetivo de este estudio fue caracterizar el mucílago de nopal de tres diferentes estados de madurez, a saber, tierno, joven, maduro según su composición química proximal, análisis de grupos funcionales, identificación y cuantificación de azúcares, así como el microanálisis elemental de los respectivos nopales. Los resultados mostraron que el mucílago de nopal maduro presentó mayor contenido de cenizas, fibra y azúcares totales, 34.8, 47.5 y 14.32 g 100 g⁻¹ respectivamente, y de ácido urónico con 34.5 %, respecto a los demás mucílagos. Los grupos funcionales identificados en los tres mucílagos (O-H, C-H de metileno, C=O de carboxílico, C-N de aminas, y enlaces C-O de alcohol primario y secundario) fueron iguales. Sin embargo, mostraron diferencias en la intensidad de la banda entre los tres mucílagos. En las diferentes muestras de nopal se identificaron elementos químicos (minerales) como potasio, magnesio, calcio, fósforo, azufre, silicio y cloro. Los azúcares totales, fibra, cenizas, cristales de calcio y ácidos urónicos aumentaron con el estado de madurez del nopal. Los resultados generados podrían ser un potencial relevante para su aplicación en la remoción de metales pesados presentes en cuerpos de agua.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, nopal, mucílago, estados de madurez, composición química.

Citation: Vargas-Solano SV, Rodríguez-González F, Martínez-Velarde R, Campos-Mendiola R, Hurtado-Salgado MA, Muthuswamy Ponniah J. 2022. Chemical composition of pear cactus mucilage at different maturity stages. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2726>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: June 11, 2021
Approved: March 07, 2022.
Estimated publication date:
March 09, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 126-150.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non- Commercial
4.0 International license.



INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia ficus-indica*), conocido así en México, es una planta de la familia Cactaceae, cultivada en zonas áridas y semiáridas (Contreras *et al.*, 2015). La planta tiene metabolismo ácido crasuláceo (CAM) que le permite ser resistente a la sequía durante períodos largos y crecer en regiones áridas y semiáridas al almacenar agua en el pa-

rénquima de sus cladodios (Nuzhyna *et al.*, 2018). Debido a ello, produce mucílago en su interior (células especializadas) que lo secretan en apoplasto, y así ayuda a regular el contenido de agua celular en la planta.

Otra posible función del mucílago se puede relacionar con el Ca^{2+} (Goycoolea y Cárdenas, 2003). Por otro lado, los cladodios o pseudotallos en la etapa adulta acumulan calcio en forma de drusas (cristales de oxalato de calcio) que favorecen el flujo de calcio en su interior (Contreras *et al.*, 2015). Mientras que en la etapa joven son activos para la síntesis de proteínas, lípidos, polisacáridos y ácido oxálico.

El mucílago del nopal es un hidrocoloide compuesto principalmente por diferentes azúcares como arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa, ácido galacturónico; los cuales están presentes en forma polimérica como ácido poligalacturónico y otras sustancias pécticas.

La presencia de compuestos poliméricos está formada por dos o más azúcares con diferentes pesos moleculares que varían de 2.3×10^4 a $13 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ (Medina-Torres *et al.*, 2013). Además, la composición química del mucílago varía dependiendo de factores como la temperatura, la estación, el suelo, la región, los períodos de luz/oscuridad y la disponibilidad de agua, así como el estado de madurez (Ribeiro *et al.*, 2010; Contreras *et al.*, 2015).

Estudios previos de diferentes autores sobre la composición química y el estado de madurez del nopal son muy limitados. La hipótesis de este estudio fue que el estado de madurez del nopal produce cambios en la composición química del mucílago. Para probarlo, el objetivo fue caracterizar mucílagos de nopales de tres diferentes estados de maduración, con base en la composición química, análisis de grupos funcionales, identificación y cuantificación de azúcares, así como el microanálisis elemental de los nopales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los cladodios de *Opuntia ficus-indica* fueron cultivados y cosechados por productores en un cultivo de campo de Tepoztlán, Morelos, México ($18^\circ 58' 29.3'' \text{ N}$; $99^\circ 08' 10.1'' \text{ W}$).

La selección y recolección de los cladodios fue aleatoria de diferentes plantas en marzo de 2019, realizada temprano en la mañana (06:00 am) para no afectar la acidez y el sabor que produce el ácido málico y otros ácidos en el cladodio (durante la noche) y que se reducen en el día debido a su ciclo metabólico (formación de otros compuestos). Los cladodios se dividieron en tres etapas [promedio en días – tierno (T): 20; joven (Y): 40; maduro (M): 600].

Las espinas de las muestras se retiraron con un cuchillo de acero inoxidable y los cladodios se cepillaron y lavaron con agua destilada y jabón líquido para eliminar todas las partículas externas. La extracción del mucílago de muestras diferentes de nopal se realizó siguiendo el método utilizado por Rivera-Corona *et al.* (2014) el cual fue modificado durante el proceso de extracción y purificación. La modificación del método anterior fue de 1:7 (nopal: agua) a 1:1 (nopal: agua desionizada) durante la extracción, y se optó por no realizar la etapa de purificación.

El nopal limpio fue rallado y se agitó constantemente a 40 °C por 4 h durante el proceso de lixiviación. El producto lixiviado se filtró con una malla de 425 μm y se almacenó a 4 °C durante 14 h. Después se secó en un equipo de liofilización (Virtis Consol 25 SL, EUA) a -25 °C, al alto vacío durante 7 d aproximadamente y los polvos se almacenaron en recipientes herméticos.

Análisis químico del mucílago de nopal

El contenido de humedad, cenizas, proteínas, lípidos y fibra dietética total del mucílago seco (T, Y y M) se determinó por el método de secado en estufa (14.004), incineración (32.10), digestión y destilación por el método Kjeldahl (14.026). Asimismo, la extracción de lípidos se realizó con base en el método Goldfish (70.56) y el método enzimático-gravimétrico (992.16), respectivamente (AOAC, 2010). Además, el contenido de azúcares totales se determinó por el método colorimétrico fenol-sulfúrico (Feitosa *et al.*, 2021).

Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Se identificaron los espectros FTIR de las diferentes muestras de polvo de mucílago (T, Y y M) para determinar los grupos funcionales en un espectrofotómetro (IR-Affinity 1; Shimadzu, Japón) que se manejó dentro del intervalo de 600-4000 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} en una placa ATR.

Identificación de azúcares

La identificación de azúcares se llevó a cabo por medio de cromatografía en capa fina de alta resolución HPTLC (Singh *et al.*, 2021). Tres microlitros de las soluciones estándar de arabinosa, fructosa, galactosa, glucosa, sacarosa, ramnosa, xilosa, ácido galacturónico, ácido glucurónico y ácido poligalacturónico (3 mg mL^{-1} de agua desionizada) (Pureza $\geq 98\%$, Sigma-Aldrich, Alemania) y 15 μL de las soluciones de mucílago (6 mg mL^{-1}) se aplicaron en forma semiautomática (CAMAG Linomat 5, Suiza) a una placa de sílica gel F₂₅₄ con soporte de aluminio (20 cm $\times$ 10 cm) (Merck, Alemania). La placa se reveló dos veces con butanol-propanol-agua (3:12:4 v/v/v) y luego se calentó a 180 °C durante 20 min, luego se trató con difenilamina-anilina-acetona-ácido fosfórico (1:1:40:7.5 p/v/v/v) y se calentó durante 5 min a 120 °C; y finalmente se expuso a luz visible y UV (longitud de onda de 254 y 366 nm) para obtener imágenes por medio del Visualizador 2 (CAMAG, Suiza). Los azúcares identificados por HPTLC de las soluciones de mucílago T, Y y M se detectaron con el factor de retención (R_f) de las bandas presentes en las soluciones estándar.

Cuantificación de azúcares

La cuantificación de los azúcares hidrosolubles de los mucílagos estudiados se realizó con equipo HPLC (LC-MS 2020; Shimadzu, Japón), el cual fue controlado por un sistema CBM-20A con dos bombas duales LC-20AD, desgasificador DGU-20A, colector automático de muestras SIL-20AC, horno de columna CTO-20A, y detector de índice de refracción RID-10A.

La columna Prevail™ carbohidratos ES 5u (250 × 4.6 mm) (Alltech, EUA) se manejó a 30 °C con acetonitrilo-agua ultrapura (8:2 v/v) como fase móvil en una elución isocrática, con un caudal de 1 mL min⁻¹ para un volumen de muestra de 20 µL (Software Lab., sol. versión 5.0). La detección de estos azúcares se realizó a una longitud de onda de 195 nm y se determinó con una curva estándar de arabinosa, fructosa, galactosa, glucosa, ramnosa y xilosa.

Cuantificación de ácidos urónicos

La cuantificación de ácido urónico de los diferentes mucílagos en solución (2 mg mL⁻¹ de agua destilada) se analizó por el método colorimétrico con carbazol (Feitosa *et al.*, 2021). Para ello se mezclaron 100 µL de mucílago en una solución con 6 mL de H₂SO₄ concentrado en frío y se colocaron en baño maría en ebullición por 10 min. La mezcla se enfrió a temperatura ambiente y luego se agregaron 0.4 mL de solución alcohólica de carbazol (0.1 %).

La absorbancia se midió en un espectrofotómetro UV-160A (Shimadzu, Japón) a 530 nm (después de 30 min) y la concentración se determinó con una curva de calibración con ácido galacturónico (soluciones de 0.25 a 1 mg mL⁻¹ de agua destilada) como estándar y se hizo un ajuste del modelo de regresión lineal con R² de 0.998.

Microscopía electrónica de barrido (SEM) y microanálisis elemental

Se realizó un análisis de los microelementos minerales en diferentes secciones de los nopales frescos estudiados (T, Y y M). Las muestras se observaron en un microscopio electrónico de barrido (CARL ZEISS EVO LS 10, Alemania) y se analizaron con un detector de energía dispersiva (EDX) acoplado al microscopio para determinar la composición elemental.

Análisis estadístico

Los experimentos de composición química, cuantificación de azúcares, así como cuantificación de ácidos urónicos se realizaron por triplicado. Los resultados se expresaron como valores medios con una desviación estándar ±. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa estadístico SigmaPlot v. 14.0 (Systat Software Inc., 2017). Los valores medios de las variables estudiadas en los diferentes grupos se discriminaron con un análisis de varianza de una vía, seguido de pruebas de comparación múltiple de Tukey, con $p \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición química del mucílago

El análisis de la composición química del mucílago extraído de *O. ficus-indica* de diferentes estados de madurez de crecimiento utilizados en este estudio (Cuadro 1) se codificaron como mucílago tierno (T), joven (Y) y maduro (M). El contenido de humedad en los tres tipos de mucílagos varió de 4.2 a 5.9 g 100 g⁻¹, con diferencias entre M y los demás mucílagos. Estos resultados son similares a otro estudio realizados en mucílagos de nopal (Rivera-Corona *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Composición química de mucílagos de nopal (*Opuntia ficus-indica*) de diferentes estados de madurez.

Composición (g 100 g ⁻¹)	Tierno	Joven	Maduro
Humedad [†]	5.9 ± 0.4 a	5.3 ± 0.2 a	4.2 ± 0.1 b
Proteína [†]	15.0 ± 0.3 a	14.7 ± 0.2 a	10.1 ± 0.1 b
Grasa [†]	4.4 ± 0.2 a	4.1 ± 0.1 a	2.3 ± 0.1 b
Ceniza [†]	29.8 ± 1.3 b	30.1 ± 0.8 b	34.8 ± 0.6 a
Azúcares totales [†]	45.4 ± 0.3 b	45.3 ± 0.3 b	47.5 ± 0.5 a
Fibra [‡]	8.61 ± 0.1 c	8.97 ± 0.1 b	13.7 ± 0.1 a

[†]Media ± desviación estándar (n = 3). [‡]Media ± desviación estándar (n = 2). Medias en una fila con diferentes letras señalan diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

El bajo contenido de humedad se debe al proceso de secado de las muestras. Sin embargo, en ninguno de estos casos se produjo la eliminación total del agua, debido a que el agua ligada al material produce interacciones entre las cargas dipolares del agua y las cargas negativas de los grupos funcionales de las macromoléculas presentes en el mucílago (Goycoolea y Cárdenas 2003).

El mayor contenido de proteína en el mucílago se observó en T e Y (15 g 100 g⁻¹ y 14.7 g 100 g⁻¹, respectivamente), los cuales mostraron diferencia con el mucílago M. También, el mismo comportamiento se observó en el contenido de grasa para T e Y de 4.4 g 100 g⁻¹ y 4.1 g 100 g⁻¹, respectivamente. El contenido de proteínas disminuyó en función del desarrollo debido a las variaciones atribuidas al engrosamiento de la cutícula y a la expansión del parénquima en nopales maduros (Astello-García *et al.*, 2015).

El contenido total de azúcares observado en el mucílago en nuestro estudio fue de 45.4 g 100 g⁻¹ a 47.5 g 100 g⁻¹, con diferencias entre el mucílago maduro y los otros dos mucílagos ($p \leq 0.05$). Estos resultados son consistentes con los requerimientos necesarios para el desarrollo y protección del nopal durante la época seca (Carpita *et al.*, 2015). Además, se observó que los azúcares totales están presentes como componente mayoritario en el mucílago, con independencia del estado de maduración. Esto se debe principalmente a la presencia de azúcares complejos neutros y ácidos que forman parte del hidrocoloide. Además, con referencia al contenido de fibra, se observó el mismo comportamiento de los azúcares; al aumentar en función del estado de maduración fueron diferentes entre los mucílagos T y Y respecto al mucílago M.

El contenido de cenizas en el mucílago M fue mayor (34.8 g 100 g⁻¹), lo cual indicó una clara diferencia con los mucílagos Y y T (30.1 g 100 g⁻¹ y 29.8 g 100 g⁻¹). El contenido de cenizas en el mucílago se debió principalmente a minerales duros y tuvo una tendencia a aumentar en función del estado de madurez, de acuerdo con Messina *et al.* (2021) para mucílago fresco de *O. ficus-indica* durante el período de crecimiento estacional (reposo a post-cosecha). Sin embargo, tuvo un contenido de cenizas menor que el obtenido para el mucílago estudiado.

Análisis FTIR

Los espectros FTIR de los tres mucílago estudiados mostraron bandas espectrales en la región de $3270\text{--}3217\text{ cm}^{-1}$ (Figura 1), las cuales se deben al estiramiento (extensión) del enlace O-H (grupo hidróxilo). Sin embargo, en el mucílago maduro, existe una mayor intensidad de estas bandas en comparación con los mucílago joven y tierno. Un resultado similar se observa en las bandas presentes en la región $2932\text{--}2926\text{ cm}^{-1}$, las cuales están relacionadas con el estiramiento (extensión) asimétrico del enlace C-H del grupo metileno ($-\text{CH}_2$). Asimismo, las bandas observadas en las regiones de $1714\text{--}1709\text{ cm}^{-1}$, $1599\text{--}1595\text{ cm}^{-1}$ y 1400 cm^{-1} están relacionadas con la vibración del estiramiento (extensión) del C=O del ácido carboxílico (RCOOH); estas bandas mostraron una intensidad mayor en el mucílago maduro con respecto a los mucílago T e Y. Las bandas detectadas en $1328\text{--}1312\text{ cm}^{-1}$ y $1256\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$ corresponden con el estiramiento C-N de aminas; hubo una mayor intensidad en las bandas del mucílago T, mientras que las bandas identificadas en 1080 cm^{-1} y 1040 cm^{-1} corresponden a las vibraciones del estiramiento (extensión) de los enlaces C-O del alcohol primario y secundario del anillo piranosa; también hubo una mayor intensidad en las bandas del mucílago maduro. Mientras que las bandas observadas en la región de $916\text{--}773\text{ cm}^{-1}$ se deben a la curvatura fuera del plano C-H y a la mono sustitución (fenil) sobre los compuestos fenólicos.

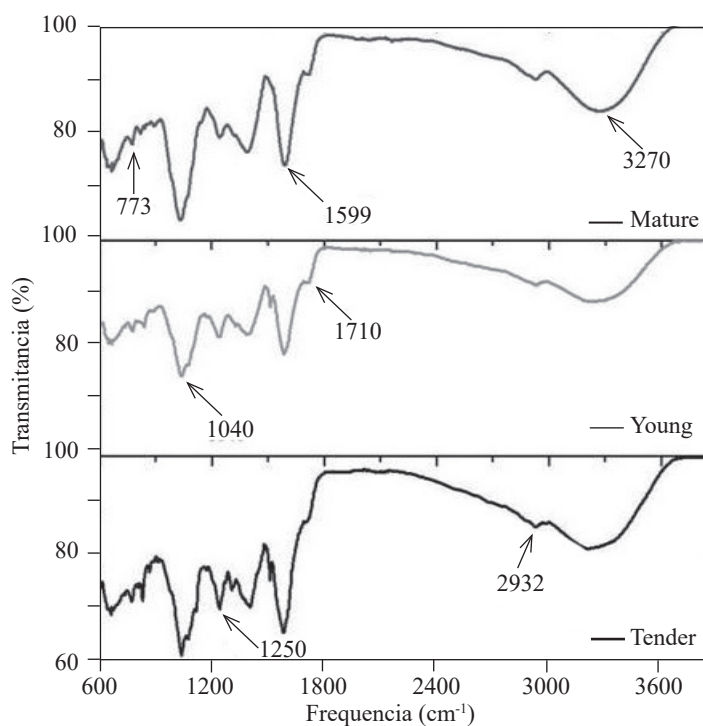


Figura 1. Espectros FTIR de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) tierno, joven y maduro.

Los grupos identificados en este estudio (O-H, C-H, C=O, C-N, C-O) también fueron observados por Rivera-Corona *et al.* (2014) para mucílagos de nopal liofilizados, polvos y geles de mezclas de almidón de sorgo-mucílagos. Esos autores observaron un aumento de la intensidad de las bandas al aumentar la concentración de mucílagos en las mezclas; este resultado se atribuyó al aumento de grupos funcionales por la mayor concentración de mucílagos. Por lo tanto, una mayor intensidad de las bandas de los grupos funcionales C=O, C-H y O-H del mucílagos maduro podría deberse al mayor contenido de compuestos urónicos.

Identificación de azúcares

Los mucílagos T, Y y M por HPTLC tuvieron en su composición glucosa y fructosa (Figura 2), como era de esperarse, debido a que estos azúcares son generados por las reacciones bioquímicas de la planta derivadas de la vía metabólica denominada glucólisis (Carpita *et al.*, 2015). Además, en los mucílagos se identificaron xilosa, ácido galacturónico y ácido poligalacturónico. Este último compuesto se detectó cerca de la línea de aplicación, es decir, interactuó con el gel de sílice en la placa. Este resultado indica que el compuesto es polar debido al alto contenido de grupos hidroxilos (-OH) que están presentes en sus moléculas. Asimismo, en el mucílagos M se identificó galactosa, mientras que en los mucílagos Y y T se detectó ramnosa.

Cuantificación de azúcares

La identificación de los diferentes azúcares se realizó comparando el tiempo de retención de los estándares con el de los mucílagos estudiados (T, Y y M) y se determinaron de acuerdo con la curva estándar de los azúcares. El mayor contenido de arabinosa, glucosa y fructosa se observó en el mucílagos Y con 0.55, 168.3 y 4.2 mg g⁻¹, respectivamente, mientras que el primer azúcar mencionado no se detectó en el mucílagos T (Figura 3).

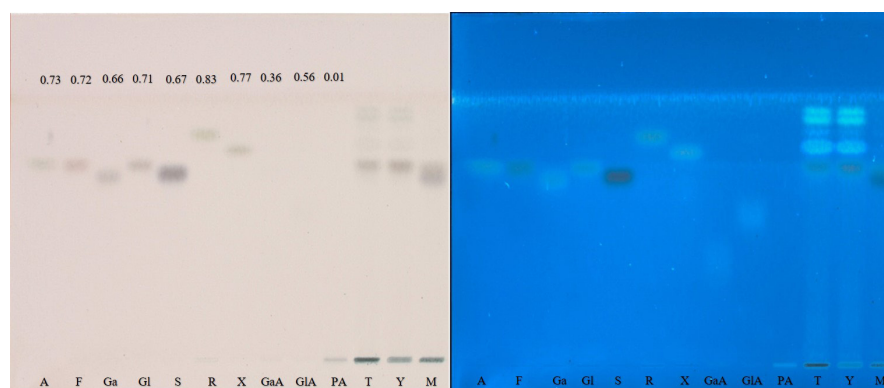


Figura 2. Cromatogramas resultado del análisis por HPTLC de azúcares de mucílagos de nopal (*Opuntia ficus-indica*) de diferentes estados de madurez. A: arabinosa, F: fructosa, Ga: galactosa, Gl: glucosa, S: sacarosa, R: ramnosa, X: xilosa, GaA: ácido galacturónico, GLA: ácido glucurónico y PA: ácido poligalacturónico, T: tierno, Y: joven y M: maduro.

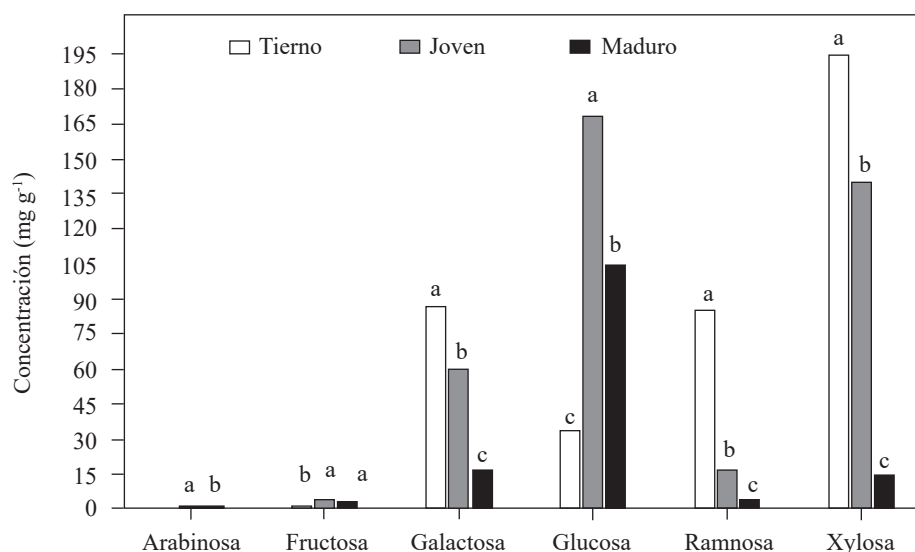


Figura 3. Concentración de azúcares en mucílagos de nopal (*Opuntia ficus-indica*) de diferentes estados de madurez. Medias en las barras con letras diferentes indican diferencia estadística ($p \leq 0.05$).

La presencia y variaciones en la concentración de glucosa y arabinosa en los diferentes mucílagos concuerda con lo reportado por Ribeiro *et al.* (2010) para una fracción de mucílago de alto peso de nopales pelados que tenían entre seis y doce meses, en los que obtuvieron diferentes concentraciones de los azúcares y compuestos de diferente peso molecular.

Sin embargo, el mayor contenido de galactosa, ramnosa y xilosa estuvo presente en el mucílago T con 86.4, 84.9 y 193.8 mg g⁻¹ respectivamente; diferente de los mucílagos Y y M. La disminución de galactosa con los estados de madurez podría atribuirse a la oxidación de C6 para la formación de ácido galacturónico.

Ribeiro *et al.* (2010) encontraron un mayor contenido de galactosa en el mucílago Y, y una disminución en el mucílago maduro en nopal *O. ficus-indica* de la variedad Palma Gigante; también observaron que el mucílago T presentó el mayor contenido de azúcares neutros y estos compuestos disminuyeron en función del estado de maduración. Por lo tanto, las variaciones de estos azúcares en el mucílago de nopal de diferentes estados de maduración se debieron a la variedad y requerimientos de la planta para la formación de otros metabolitos primarios o secundarios necesarios para los estados de maduración del nopal. Por ejemplo, la reducción del contenido de azúcares simples en el mucílago M podría deberse al metabolismo en la planta para la reproducción, que luego de 360 d de maduración se especializa en la producción de flores y frutos. Los cladodios con más de 600 d de maduración a menudo forman y desarrollan nuevos cladodios en la planta (Nuzhyna *et al.*, 2018). Según los resultados de Di Lorenzo *et al.* (2017) para el caso del mucílago de nopal, estos azúcares forman componentes poliméricos de alto peso molecular. Uno es lineal, denominado β -(1→4)-galactanos

(galactopiranosas) y el otro es ramificado, llamado xiloarabinano, compuesto por un esqueleto de arabinofuranosilo α -(1 $\rightarrow$ 5) unido con residuos de arabinofuranosilo adicionales y la presencia de unidades de xilosa como grupos protectores para la planta.

Ácidos urónicos

El contenido de ácidos urónicos es mayor en el mucílago M (345.8 mg g⁻¹) y mostró diferencias en el contenido de estos compuestos con el mucílago Y y T (112.9 y 100.7 mg g⁻¹, respectivamente). Además, la concentración de ácidos urónicos cuantificada en los mucílago aumenta con los estados de madurez del nopal. Por otro lado, el contenido de ácido urónico para los tres mucílago estudiados estuvo en el intervalo para el mucílago de nopal purificado con isopropanol (11.64 %) y la fracción de pectina total (60.66 %) (Bayar *et al.*, 2016). El resultado del incremento en el contenido de ácidos urónicos con el estado de madurez es similar al reportado para el mucílago purificado de etapa joven y madura de diferentes variedades de *O. ficus-indica* (Ribeiro *et al.*, 2010).

La tendencia creciente en el contenido de ácidos urónicos y decreciente en la galactosa, ramnosa y xilosa en función del estado de madurez de *O. ficus-indica* se puede relacionar con los requerimientos de la planta para otras funciones. Por ejemplo, en la síntesis de azúcares formadores de polisacáridos de tipo ramnogalacturonanos que forman las sustancias mucilaginosas o también llamadas pécticas en la pared celular primaria (Vriesmann y de Oliveira, 2017). Estas tienen la función principal de retener o almacenar el agua para sobrevivir en condiciones de sequía por periodos largos (Bayar *et al.*, 2016). Sin embargo, después de un período corto de tiempo, la planta desarrollada tiene otros requerimientos (después de 37 d), como la reducción de la síntesis de sustancias pectínicas, y el aumento en la concentración de azúcares ácidos para la formación de hemicelulosa (compuesta por azúcares neutros y ácidos). Los cuales se depositan junto con la celulosa y la lignina en la pared celular secundaria, y generan un engrosamiento de la pared que se traduce en mayor soporte y rigidez en la planta madura (Nuzhyna *et al.*, 2018).

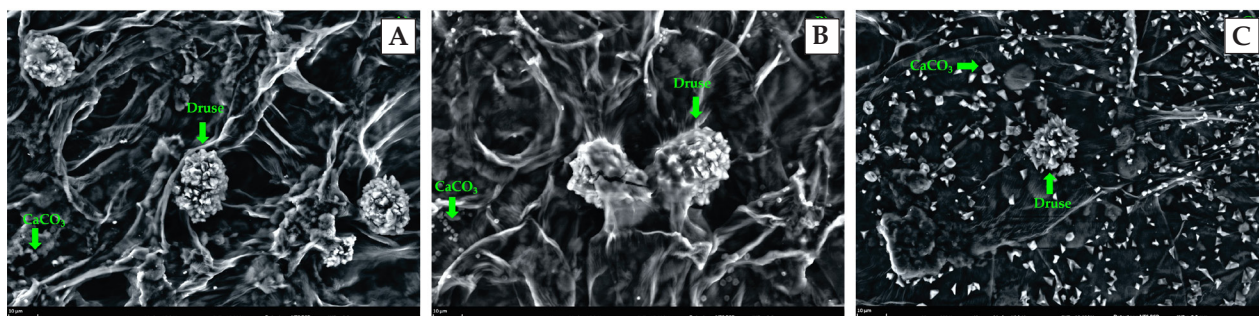


Figura 4. Imágenes SEM de estructuras de calcio en nopal (*Opuntia ficus-indica*). A: nopal tierno; B: nopal joven; C: nopal maduro.

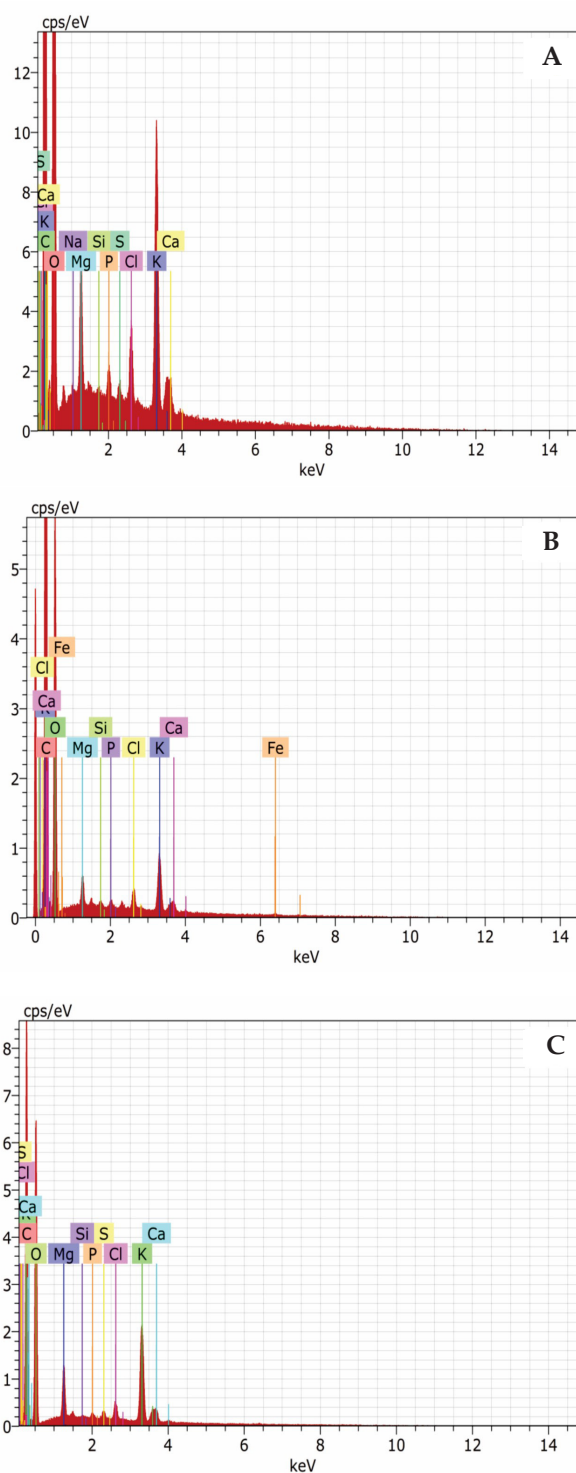


Figura 5. Microanálisis elemental de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en diferentes estados de madurez. A: nopal tierno; B: nopal joven; C: nopal maduro.

SEM y microanálisis elemental

Las imágenes obtenidas con SEM de los nopales en diferentes estados de maduración mostraron que los cristales se encuentran inmersos en el interior de las muestras de nopal, y presentan forma cúbica (Figura 4 A-C). El tamaño de los cristales varía entre 1.6 y 5.8 μm , que se observó principalmente en las muestras de nopal M; seguida de Y y finalmente T (Figura 4C).

Con base en las diferencias observadas anteriormente, en los cristales identificados como sal de carbonato de calcio (CaCO_3) (Contreras *et al.*, 2015), se considera que la cantidad de cristales aumentó en función del estado de madurez del nopal y se relacionó con el aumento del contenido de cenizas.

Además, se puede observar la morfología de fragmentos de cristales de oxalato de calcio y estructuras formadas por la unión de drusas que corresponde a una forma de estrella o roseta con picos afilados, que tienen tamaños entre 10 y 30 μm y disminuyen a medida que el nopal madura.

La disminución de oxalatos y el aumento de CaCO_3 sugieren que la planta tenía un mecanismo de regulación de calcio bidireccional, el cual consistió en la fragmentación de las drusas por acción enzimática cuando la planta necesitaba disponer de dióxido de carbono o calcio. Este proceso se detenía cuando la planta tenía un exceso de calcio (CaCO_3) y se agregaban estos cristales para generar de nuevo oxalatos como reserva de calcio. Por lo tanto, el aumento de los cristales de forma cúbica y la reducción de drusas en plantas con alrededor de 100 d de maduración sugieren que este comportamiento se debe al proceso bioquímico de la planta para los eventos de apertura y cierre de las estomas, las cuales deben estar cerradas durante el día para evitar el intercambio de gases y la pérdida de agua, debido al metabolismo ácido crasuláceo (CAM) (Nuzhyna *et al.*, 2018).

Las imágenes del microanálisis elemental de muestras de nopal en diferentes estados de madurez confirmaron la presencia de potasio, magnesio, calcio, fósforo, azufre, silicio y cloro (nopal T, Y y M en la Figura 5A, B y C, respectivamente). Además, se observa la presencia de sodio en el nopal T y de hierro en el nopal Y.

Estos elementos identificados, excepto azufre, silicio y cloro, son los principales minerales identificados en las especies de *Opuntia* analizadas (*O. ficus-indica*, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha*) (Astello-García *et al.*, 2015).

La presencia de calcio en el nopal está relacionada con los oxalatos de calcio (Figura 4) los cuales actúan como respuesta a diversos factores abióticos y bióticos. En tanto que el magnesio es un elemento esencial para la composición de la clorofila, la cual es fundamental para el proceso de fotosíntesis.

CONCLUSIONES

El estudio del mucílago de nopal con diferentes estados de madurez mostró cambios en la composición química. Con disminución en contenido de proteína, extracto de etéreo y azúcares como galactosa, ramnosa y xilosa; y también aumento en el contenido de azúcares totales, fibra, cenizas, cristales de calcio y ácidos urónicos en función

de los estados de madurez (mucílago tierno a mucílago maduro) debido a los requerimientos bioquímicos de la planta.

El mucílago extraído de nopal maduro presentó el mayor contenido de ácidos galacturónicos y se confirmó con FT-IR. Esta técnica lo demostró cualitativamente, con la intensidad en las bandas, que el mucílago maduro contenía más grupos funcionales relacionados con los ácidos urónicos. Los elementos potasio, magnesio y calcio se identificaron en el nopal *Opuntia ficus-indica*.

El estudio de la composición del mucílago de nopal en diferentes estados de madurez es importante para explotar su uso en la industria, de acuerdo con las propiedades que le otorgan sus compuestos y que son requeridas para cada producto.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el apoyo financiero otorgado a F. Rodríguez-González para realizar este estudio, a través de los proyectos SIP-IPN No. 20210224. Al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), y a la COFAA & EDI del IPN, México.

REFERENCIAS

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2010. Official Methods of analysis. 15th ed. AOAC International: Arlington, VA, USA. 1298 p.
- Astello-García MG, Cervantes I, Nair V, Santos D MS, Reyes-Agüero A, Guéraud F, Negre-Salvayre A, Rossignol M, Cisneros-Zevallos L, Barba de la Rosa AP. 2015. Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis* 43: 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>
- Bayar N, Kriaa M, Kammoun R. 2016. Extraction and characterization of three polysaccharides extracted from *Opuntia ficus indica* cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules* 92: 441–450. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.07.042>
- Carpita N, Ralph CJ, McCann MC. 2015. The cell wall. In: Buchanan BB, Gruissem W, Jones RL. (eds). *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. The American Society of Plants Physiologist. Maryland. pp: 45–110.
- Contreras-Padilla M, Rivera-Muñoz EM, Gutiérrez-Cortez E, del Real-López A, Rodríguez-García ME. 2015. Characterization of crystalline structures in *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Biological Physics* 41: 99–112. <https://doi.org/10.1007/s10867-014-9368-6>
- Di Lorenzo F, Silipo A, Molinaro A, Parrilli M, Schiraldi C, D'Agostino A, Izzo E, Rizza L, Bonina A, Bonina F, Lanzetta R. 2017. The polysaccharide and low molecular weight components of *Opuntia ficus indica* cladodes: Structure and skin repairing properties. *Carbohydrate Polymers* 157: 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.073>
- Feitosa B, Freitas DA, da Silva JNR, Gonçalves M. de Freitas A, Assreuy AM. 2021. Polysaccharide-rich extract of *Caesalpinia ferrea* stem barks attenuates mice acute inflammation induced by zymosan: Oxidative stress modulation. *Journal of Ethnopharmacology* 267: 113501. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113501>
- Goycoolea FM, Cárdenas A. 2003. Pectins from *Opuntia* spp.: A short Review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 5: 17–29. <https://www.jpacd.org/jpacd/article/view/302/261>
- Medina-Torres L, García-Cruz EE, Calderas F, González-Laredo RF, Sánchez-Olivares G, Gallegos-Infante JA, Rocha-Guzmán NE, Rodríguez-Ramírez J. 2013. Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*). *LWT - Food Science and Technology* 50: 642–650. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.038>
- Messina CM, Arena R, Morghese M, Santulli A, Liguori G, Inglese P. 2021. Seasonal characterization of nutritional and antioxidant properties of *Opuntia ficus-indica* [(L.) Mill.] mucilage. *Food Hydrocolloids* 111: 106398. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106398>

- Nuzhyna N, Baglay K, Golubenko A, Lushchak O. 2018. Anatomically distinct representatives of Cactaceae Juss. family have different response to acute heat shock stress. *Flora*. 242: 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.03.014>
- Ribeiro EM, da Silva NE, de Lima JL, de Brito JZ, Carvalho da Silva MP. 2010. Study of carbohydrates present in the cladodes of *Opuntia ficus-indica* (fodder palm), according to age and season. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 30: 933–939. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000400015>
- Rivera-Corona JL, Rodríguez-González F, Rendón-Villalobos R, García-Hernández E, Solorza-Feria J. 2014. Thermal, structural and rheological properties of sorghum starch with cactus mucilage addition. *LWT - Food Science and Technology* 59: 806–812. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.011>
- Systat Software Inc. 2017. Procedure Guide, SigmaPlot version 14.0 (computer program). Systat Software Inc, San Jose, California.
- Singh RS, Singh T, Singh D, Kennedy JF. 2021. HPTLC-densitometry quantification of fructooligosaccharides from inulin hydrolysate. *International Journal of Biological Macromolecules* 177: 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.116>
- Vriesmann LC, de Oliveira CL. 2017. Cacao pod husks as a source of low-methoxyl, highly acetylated pectins able to gel in acid media. *International Journal of Biological Macromolecules* 101: 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.082>



EFFECT OF NaCl CONCENTRATION ON THE PRODUCTION OF *Arthrospira maxima* CULTIVATED IN THE HUMID TROPICS

Baruc Fernández-Corte¹, Aleida Selene Hernández-Cázares¹, Fernando Carlos Gómez-Merino¹,
Ramón de Cangas³, Mónica Rodríguez-Palacio⁴, Oscar García-Gómez⁵, María Antonieta Ríos-Corripio^{2*}

¹ Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

² CONACYT-Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

³ Fundación Alimenta Tu Salud - Calle Uria 38 - 4 A, Oviedo, Asturias, España. C. P. 33003.

⁴ Laboratorio de Ficología Aplicada AS 202. Departamento de Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa, Ciudad de México. C. P. 09340.

⁵ Ingeniería Química e Ingeniería en Biotecnología. Universidad Iberoamericana Puebla. San Andrés Cholula, Puebla, México. C. P. 72810.

* Corresponding author: rios.antonietta@colpos.mx

ABSTRACT

The production of microbial biomass can be affected by the composition of the culture medium, including the content of salts and there is little information in terms of the NaCl concentration. Therefore, in this study, the effect of the addition of different NaCl concentrations (0.0, 2.0, 2.5, and 3.0 g L⁻¹) in a Jourdan medium was evaluated on cell growth and physical and chemical properties of *Arthrospira maxima* cultivated in the region of Cordoba, Veracruz, Mexico. The experiment was established under a completely randomized design with a factorial arrangement (AxB). During the production stage, cell growth and morphology of filaments were evaluated, and after harvesting, the physical and chemical analysis (moisture, crude fiber, total protein and lipid content, mineral composition, photosynthetic compounds, antioxidant activity, and structural composition through FTIR-Spectroscopy analysis) of *A. maxima* was performed. Results obtained show that the addition of NaCl did not affect cell development, the morphology of the filaments, or the content of photosynthetic compounds. The maximum rate of biomass production in all treatments was at 6 d, without significant differences ($p > 0.05$) among treatments. In all treatments, *A. maxima* showed adequate concentrations of protein and minerals, as well as antioxidant activity. FTIR spectra showed absorption bands associated with proteins, carbohydrates, lipids, and nucleic acids. A decrease in the amide I and amide II bands of the proteins was observed with the addition of NaCl. *A. maxima* cultivated in these tropical climatic conditions had excellent properties to be used as a functional ingredient in the development of innovative and biotechnological food products for human consumption.

Keywords: antioxidant, *Arthrospira maxima*, cyanobacteria, NaCl, production, protein.

Citation: Fernández-Corte B, Hernández-Cázares AS, Gómez-Merino FC, de Cangas R, Rodríguez-Palacio M, García-Gómez O, Ríos-Corripio MA. 2022. Effect of NaCl concentration on the production of *Arthrospira maxima* cultivated in the humid tropics. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2735>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 29, 2021.
Approved: March 15, 2022.
Estimated publication date:
March 16, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 151-180.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCTION

Spirulina is the name by which a group of species of the *Arthrospira* genus is known, consisting of photosynthetic cyanobacteria with spiral-shaped filaments (Wan *et al.*,

2016). This group of cyanobacteria contributes around 55 - 70 % of the protein in dry weight; in addition to containing other nutrients such as carbohydrates (15 - 25 %), lipids (5 - 6 %), vitamins (pro-vitamin A, ascorbic acid, tocopherol, and B-complex vitamins), nucleic acids (6 - 13 %), pigments (phycocyanin, chlorophyll, and carotenoids), and minerals (calcium, magnesium, potassium, iron, phosphorus, manganese, copper, sodium, and selenium) (Wan *et al.*, 2016). Due to their properties and characteristics, different production areas have focused on making use of these cyanobacteria in order to develop new innovative products for social welfare (Mehar *et al.*, 2019).

The growth of these microorganisms is influenced by factors such as the nutrient solution, the amount of initial strain, pH, temperature, and sunlight (Ogbonda *et al.*, 2007). Naturally, the species of the *Arthrospira* genus grow in highly alkaline waters ($< 30 \text{ g L}^{-1}$) with a pH of around 8.5 – 11.0, the higher the pH and the conductivity of the water, the greater the survival of these organisms (Wan *et al.*, 2016). For their cultivation, the nutrient solutions must contain an adequate level of salts to reach optimal values of pH and electrical conductivity (Mutawie, 2015). In the current market, there are different nutrient media formulated according to the culture growth conditions (Soni *et al.*, 2017). However, an imbalance in the optimal concentration of mineral salts can negatively affect production, nitrates and chlorides have the greatest impact on the induction of osmotic stress (Vonshak *et al.*, 1983).

Due to different mechanisms developed through evolution, cyanobacteria of the *Arthrospira* genus can adapt to stress, through morphological, physiological, and biochemical adjustments that cause saturation of organic solutes and metabolites (Sujatha and Nagarajan, 2014). All these osmotic adjustments cause the subcellular structures to be protected and some antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD), polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD), and catalase (CAT) to reduce the oxidative damage caused by those free radicals that originated by high salinity levels (Kebeish *et al.*, 2014).

Within the *Arthrospira* genus, about 40 species are described, one of which is *A. maxima*, which has been cultivated for hundreds of years in the basin of Lake Texcoco, Mexico, in temperate climate conditions, but few studies have been developed to evaluate performance in tropical climates. The objective of this study is to evaluate the effect of adding different NaCl concentrations on the physical and chemical properties of *A. maxima* cultivated in the tropical region of Córdoba, Veracruz, Mexico. The hypothesis to be tested is that this species can be cultivated in the tropical climate conditions of Córdoba, Veracruz, and that the salinity induced by the addition of NaCl would modify metabolism and the concentration of biomolecules and bioactive compounds.

MATERIALS AND METHODS

Description of the photobioreactor

To evaluate the growth and biomass production of *A. maxima* under humid tropical climate conditions, a low-cost photobioreactor of our design was implemented. This photobioreactor is made up of: 1) a translucent plastic container, 25.5 cm high x 13.3

cm long x 11.5 cm wide (with a capacity of 3 L), which allows sunlight to fall on the cells and thus facilitate photosynthesis; and 2) an aeration system, using an air pump (Hagen, Elite 802; China) with a capacity of 75 L h⁻¹ for the oxygenation of the culture medium.

Growing conditions

The strain of *A. maxima* used in the experiment was donated by the Faculty of Chemical Engineering of the Universidad Iberoamericana de Puebla, and the Universidad Autónoma Metropolitana Campus Iztapalapa, Mexico. The cultivation of *A. maxima* was established outdoors in a shade mesh greenhouse, with average temperature and solar radiation during the year of 30 °C and 759 w m⁻², located in the experimental field of the Colegio de Postgraduados Campus Cordoba, Veracruz, Mexico, located at 18° 51' 24" N, 96° 51' 47" W, at 645 m.

The cells were inoculated in a Jourdan alkaline medium at a concentration of 2.16x10³ cells mL⁻¹ (with a previous cell count using the Sedgewick Rafter chamber) under the following composition (per liter of purified water): 2 g KNO₃, 8 g NaHCO₃, 0.2 g MgSO₄, 0.1 g NaH₂PO₄, and 0.1 g FeSO₄. All the components were mixed in dechlorinated water. To evaluate the effect of NaCl, culture batches in triplicate were established at different salt concentrations: 2.0 (T2), 2.5 (T3), and 3 (T4) g L⁻¹ NaCl, and a control culture (T1) without the addition of NaCl. Each 3 L experimental unit was inoculated with a 2 L stock solution of *A. maxima* cells, previously adapted.

Biomass production

Cell growth and morphology of *A. maxima* were evaluated according to the method established by Huarachi-Olivera *et al.* (2015), using an optical microscope (Carl Zeiss, Primo Star Fixed-Köhler HAL/LED; White Plains, NY, USA) with a 10X objective lens. A sample of each treatment was extracted every 72 h for 12 d. *A. maxima* cells were preserved with Lugol's solution for 24 h, following the method by Rosińska *et al.* (2017), and then the cell count was done with the use of the Sedgewick Rafter chamber. Cell density (D) was calculated according to the following equation.

$$D \text{ (cel mL}^{-1}\text{)} = \frac{\text{number of counted cells}}{\text{number of counted field}} \times \frac{1000 \text{ fields}}{1 \text{ mL}} \quad (1)$$

Obtaining biomass

Biomass collection was carried out at 12 d, using the filtering method (40-micron fabric, 200 threads cm⁻³) of 1/3 of the volume of the culture medium. The biomass was rinsed with distilled water to remove the excess of nutrient salts. The fabric was dehydrated in a hot air dryer (Excalibur, 2900ECB; Sacramento, CA, USA) at 45 °C for 4 h to preserve the most labile components, according to the method described by Desmorieux *et al.* (2010). The resulting material was ground in a food processor (Nutribullet, NB-101B;

Hong Kong, China). The dried samples were packed in hermetically sealed bags and stored at room temperature until analysis.

Physical and chemical analysis

The moisture and crude fibre content of the *A. maxima* powder were determined based respectively on the Official Mexican Standard NOM-F-083-1986 (<https://studylib.es/doc/5465578/nmx-f-083-1986-alimentos-determinaci%C3%B3n-de-humedad-en>) and the Mexican Standard NMX-F-090-S-1978 (http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4799842&date=03/27/1979).

The protein content was determined based on the provisions of the Official Mexican Standard NOM-F-068-S-1980 Kjeldahl method (http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4858024&fecha=04/08/1980). The percentage of protein was obtained by multiplying the percentage of nitrogen by the factor 6.25. The total lipid content was evaluated according to the NMX-F-089-S-1978 standard (http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=678206&fecha=21/05/2004) and the Soxhlet technique model EXTRACTION-06C, using petroleum ether for extraction.

For the determination of the mineral concentration of *A. maxima*, the obtained powder was dried at 72 °C for 48 h in a forced-air oven to remove moisture from the sample (Riossa HCF-125; Guadalajara, Mexico), and ground to a particle size of 2 mm. The total nitrogen (N) content was determined by the Kjeldahl method (Bremner, 1965). The sample was placed in a digester, with a solution of $C_7H_6O_3$ in H_2SO_4 at a concentration of 3.3 %. To determine the concentrations of P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, and B, acid digestion of the dry and ground sample was done with $HNO_3:HClO_4$ (2:1, v/v), according to the method described by Alcántar and Sandoval (1999), and an inductively coupled plasma optical emission spectrophotometer (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, USA) was used for determination.

Determination of photosynthetic compounds

Chlorophyll-*a* was evaluated according to the method described by Harborne (1973) with some modifications. A 0.25 g sample of powdered *A. maxima* was homogenized with 10 mL of 80 % acetone, vortexed for 1 min, and incubated at 4 °C for 24 h in the dark. Of the total volume, 5 mL were taken and centrifuged at 9391 xg for 10 min. Then, 0.5 mL of the supernatant was taken and made up to 10 mL with distilled water to be measured at wavelengths of 663 nm and 645 nm with a UV-Visible spectrophotometer (Thermo Scientific, GENESYS 10S; Madison, WI, USA). Chlorophyll-*a* concentration was calculated with equation 2.

$$\text{Chlorophyll } a \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{12.70 (A_{663}) - 2.59 (A_{645})}{\text{Dry weight (g)}} \quad (2)$$

Phycocyanin (PC) was determined following the methodology established by Bryant *et al.* (1979) with some modifications. A 0.25 g sample of powdered *A. maxima*

was homogenized with 10 mL of potassium phosphate buffer (50 mM, pH 6.8). Subsequently, it was frozen at -80 °C for 48 h, then thawed to be centrifuged at 9391 xg for 15 min. Finally, 0.5 mL of the supernatant were taken, made up to 10 mL with distilled water, and the absorbance at 615 and 652 nm were measured in a UV-Visible spectrophotometer (Thermo Scientific, GENESYS 10S; Madison, WI, USA). The PC concentration was calculated with equation 3.

$$\text{PC (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{A}_{615} - 0.0474 (\text{A}_{652}))}{5.34} \quad (3)$$

FTIR spectroscopy

The structural composition of *A. maxima* was determined with a Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) (Bruker, Vertex; Billerica, MA, USA) by the Attenuated Total Reflectance (ATR) method. The spectrums of each treatment were obtained in triplicate and 64 scans averaged with a resolution of 4 cm⁻¹ in the spectral region of 4000-400 cm⁻¹ were used. For the analysis of the spectra, Origin 6.1 (OriginLab Corporation; Northampton, MA, USA) was used.

Antioxidant Activity

The capturing activity of the aqueous extract of *A. maxima* and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) was determined based on the method described by Brand-Williams *et al.* (1995). The aqueous extract of each treatment of the powdered *A. maxima* was prepared according to the method described by Velázquez *et al.* (2014) with some modifications. A 0.25 g sample of powdered *A. maxima* was mixed with 10 mL distilled water, incubated for 30 min at room temperature, and homogenized with a vortex every 10 min. From the mother extract, 0.25 mL was taken and made up with 10 mL distilled water. 2 mL of the solution was taken, mixed with 2 mL of the DPPH solution (0.0039 g 100 mL⁻¹ ethanol), stirred vigorously for 10 s, kept in the dark for 20 min and measured at 517 nm with a UV-Visible spectrophotometer (Thermo Scientific, GENESYS 10S; Madison, WI, USA). The antioxidant activity was calculated using equation 4:

$$I (\%) = \frac{1 - A_s}{A_c} \times 100 \quad (4)$$

where *I* is the inhibition (%); *A_s*, the absorbance of the sample, and *A_c*, the absorbance of the blank, sample solution, and water without DPPH.

Statistical analysis

For the statistical analysis of the data, a completely randomized design with an A×B factorial arrangement was used; factor A was the NaCl concentration added to the

culture medium with four levels (0, 2.0, 2.5, and 3.0 g L⁻¹) and factor B was the growth time with five levels (0, 3, 6, 9, and 12 d). The analysis was done with SAS® v.9.4. Mean comparisons were done using Tukey's test, $p \leq 0.05$. The selection of this test responded to the multiple comparisons among all treatments, looking for the test that allows a better control in the decision errors. Likewise, the comparison of means of the chemical analyses of powdered *A. maxima* was done using Student's t-test, $p \leq 0.05$. The study was based on this test since the number of observations ($n < 30$) best fit a *t*-distribution for statistical analysis. In both tests, the interest was the paired comparison of the means among all treatments.

RESULTS AND DISCUSSION

Biomass production

The cell growth and morphology of *A. maxima* changed under the different NaCl concentrations in the culture medium at the time of harvest (Figure 1). The cells developed in all treatments, filaments with three to six coils were observed, which coincides with the morphological characteristics of *Arthrospira* described by Huarachi-Olivera *et al.* (2015). Furthermore, the morphological features of *A. maxima* were not affected by the effects of sunlight, since no straight filaments were seen (Huarachi-Olivera *et al.*, 2015).

Exponential growth was observed from the first to the third day during the development of the culture (Figure 2) in all the treatments. A stationary stage is then observed from the fourth to the sixth day; on this day, the maximum production of biomass was reached (3.916×10^4 cells mL⁻¹), which indicates that from this point on, the biomass can be harvested. Finally, a stage of cell decline, or death was observed. The mean values showed no significant differences ($p < 0.0001$) among treatments, except for T1 on day 3. In studies carried out with Zarrouk medium for *A. platensis*, a gradual growth was observed from day 5 to day 15, and a decline from this day to day 20 at concentrations of 0.73, 1.41, 2.19, 2.92, and 3.65 g L⁻¹ NaCl (Mutawie, 2015). This behaviour differs from that reported in this study, since no latency or adaptation stage of the cells was observed, possibly as a consequence of the tolerance capacity of the strain to the culture medium. Furthermore, the experimental conditions were

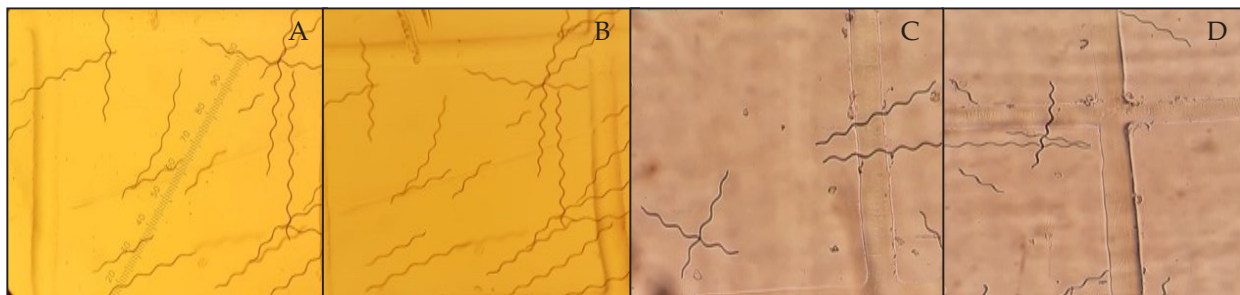


Figure 1. Filaments of *Arthrospira maxima* cultivated under different NaCl concentrations in tropical climate conditions in the region of Cordoba, Veracruz, Mexico. Images taken during the harvest. A: T1, control; B: T2, 2.0 g L⁻¹ NaCl; C: T3, 2.5 g L⁻¹ NaCl; and D: T4, 3.0 g L⁻¹ NaCl.

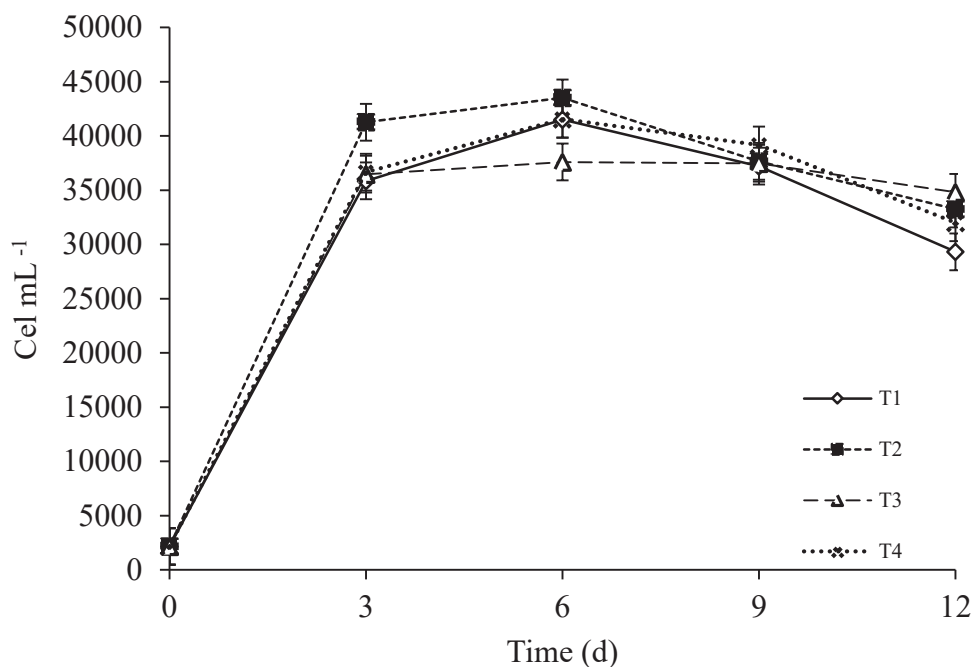


Figure 2. Growth curve of *Arthrospira maxima* cultivated in different NaCl concentrations under tropical conditions in the region of Cordoba, Veracruz, Mexico. T1: control; T2: 2.0 g L⁻¹ NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ NaCl; and T4: 3.0 g L⁻¹ NaCl.

different, since Mutawie (2015) established the experiment in a culture chamber installed in the laboratory at controlled temperature and light. In the case of this study, the experiment was outdoors under a shade-mesh greenhouse in tropical conditions, with temperatures warmer than 18 °C in the region of Cordoba, Veracruz.

Under controlled laboratory conditions, the *A. platensis* species was capable of growing at concentrations of 23.37 and 35.06 g L⁻¹ NaCl, showing potential to be produced with seawater (Liu *et al.*, 2016). When growing *A. platensis* under controlled laboratory conditions in Zarrouk medium with up to 35.06 g L⁻¹ NaCl, changes in the biochemical composition were observed in terms of biomass content, total chlorophyll, phycocyanin, and lipids (Sujatha and Nagarajan, 2014).

Additionally, the behaviour of the growth rate and the metabolic processes of the cyanobacteria could be influenced by factors such as the amount of inoculated strain, light intensity, pH, temperature, type of culture system (photobioreactors under greenhouse conditions), and not only by the concentration of nutrient salts (Ogbonda *et al.*, 2007).

Physical and chemical analysis

The physical and chemical variables analyzed showed significant differences among treatments ($p \leq 0.05$), (Table 1). The humidity in all the treatments showed significant

Table 1. Physical and chemical characterization of powdered *Arthrospira maxima* cultivated in different NaCl concentrations under tropical conditions in Cordoba, Veracruz, Mexico.

Treatment	Humidity %	Crude fibre %	Protein %	Fat %
T1	12.60 ± 0.11 a	0.27 ± 0.03 c	60.66 ± 0.45 a	1.47 ± 0.07 a
T2	9.72 ± 0.11 d	0.62 ± 0.03 a	53.78 ± 0.45 b	0.92 ± 0.07 c
T3	11.94 ± 0.11 b	0.48 ± 0.03 b	46.82 ± 0.45 d	1.13 ± 0.07 bc
T4	10.84 ± 0.13 c	0.22 ± 0.03 c	50.31 ± 0.45 c	1.24 ± 0.07 ab

* Data are expressed as mean ± standard deviation. Significant differences ($p \leq 0.05$) among treatments for the parameters measured are indicated with different letters. T1: control; T2: 2.0 g L⁻¹ NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ NaCl; and T4: 3.0 g L⁻¹ NaCl.

differences. T1 was the one that obtained the highest levels ($p \leq 0.0001$), compared to the rest of the treatments. This variation in the humidity of the samples could be attributed to external factors, such as the relative humidity in the environment, and by the drying method. Biomass treated with hot air drying is known to exhibit rapid surface dehydration, but under the surface, it forms layers that generate moisture (Stramarkou *et al.*, 2017). However, the Mexican Standard NMX-F-508-1988 specifications for *Spirulina* (http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4779957&fecha=14/10/1988) establish a maximum humidity value of 10 %, being T2 the one that is equal to or below that value.

The crude fibre analysis of the powdered *A. maxima* showed significant differences ($p \leq 0.05$) among treatments (Table 1). T2 and T3 showed the highest percentages of crude fibre, with significant differences among themselves ($p \leq 0.0001$) and the rest of the treatments. The treatments T1 and T4 obtained the lowest crude fibre content and showed no significant differences among them ($p > 0.05$), (Table 1). The Mexican Standard NMX-F-508-1988 specifications for *A. maxima* establishes that the maximum allowed crude fibre content is 0.9 %, thus the values obtained in this study are favorable and within the established reference value. Therefore, *A. maxima* may be considered a good source of dietary fibre.

The maximum protein concentration of 60.66 % was recorded in T1 at a pH range of 10.2 – 10.5 for 12 d. The total protein content decreased significantly in the treatments to which NaCl was added to the nutrient medium. The lowest protein content was obtained in T3. In *A. platensis* cultivated in Zarrouk medium, the amount of total protein gradually decreased as NaCl levels increased to 0.73, 1.41, 2.19, 2.92, and 3.65 g L⁻¹, with the control treatment reaching 69.33 % protein (Mutawie, 2015). Similarly, in *A. platensis* cultivated under standard conditions in Zarrouk medium, the protein content was 65 % in samples at pH 9.5, compared to those that received a carbon source and a pH control (7.5 and 8.5) with 18.75 % and 64 % protein, respectively (Mehar *et al.*, 2019).

In this study, the performance in the treatments is attributed to the adaptive capacity of *A. maxima* to grow under saline conditions (Mehar *et al.*, 2019). Consequently, the

treatments tested here have an excellent protein content, and the prevailing tropical climatic conditions in the region of Cordoba, Veracruz are suitable for their cultivation; therefore, it meets the protein value described by Wan *et al.* (2016).

In the case of lipids, the values of *A. maxima* under the established culture conditions were found in a range of 0.92-1.47 %. T1 showed the highest lipid value (1.47 %) and showed significant differences with T2 and T3. In *A. platensis*, 0.65 g of lipids per 100 g of dry biomass have been recorded (da Silva *et al.*, 2019), a percentage lower than that reported in this research. In *A. fusiformis* subjected to saline stress, a direct relationship was found between lipid content and salinity level (Rafiqul *et al.*, 2003). In this study, the lipid content is lower than the 5-10 % reported in the literature (Michael *et al.*, 2019). Cyanobacteria stand out for their content of macro and microelements. In this study, it was observed that the incorporation of NaCl into the culture medium had a significant influence ($p \leq 0.05$) on the concentration of minerals (Table 2). It was observed that the higher the concentration of NaCl in the nutrient medium, the lower the concentrations of P and K. Contrarily, the concentration of Ca increased as the dose of NaCl in the nutrient medium increased. The Mg concentration increased in T2 but decreased to the level of the control in T3 and T4. S was similar in the control and T2 but decreased in T3 and T4.

Regarding microelements, the concentration of Fe also increased in the same proportion as the level of NaCl increased in the culture medium. The highest concentration of B was observed in T4, followed by T2 and T3; T1 presented the lowest levels of this element. The highest concentration of Mg was observed in T4, followed by T3; T2

Table 2. Elemental composition of *Arthrospira maxima* powder cultivated in different NaCl concentrations under tropical conditions in the region of Cordoba, Veracruz, Mexico.

Elements	Treatment			
	T1	T2	T3	T4
Phosphorus (P)	9.99 ± 0.16 a	9.23 ± 0.16 b	9.04 ± 0.16 b	8.35 ± 0.16c
Potassium (K)	6.52 ± 0.11 a	5.25 ± 0.11 b	5.41 ± 0.11 b	5.05 ± 0.11 b
Calcium (Ca)	6.77 ± 0.11 d	7.74 ± 0.11 c	12.45 ± 0.11 b	19.68 ± 0.11 a
Magnesium (Mg)	3.28 ± 0.05 b	3.67 ± 0.05 a	3.42 ± 0.05 b	3.40 ± 0.05 b
Sulphur (S)	5.29 ± 0.10 a	5.11 ± 0.10 a	4.58 ± 0.10 b	4.62 ± 0.10 b
Iron (Fe)	93,515 ± 3954.79 c	122,757 ± 3954.79 b	132,720 ± 3954.79 ab	136,384 ± 3954.79 a
Boron (B)	15.32 ± 0.15 b	14.56 ± 0.15 c	14.81 ± 0.15 c	16.51 ± 0.15 a
Manganese (Mn)	19.39 ± 0.50 c	19.60 ± 0.50 c	24.30 ± 0.50 b	29.74 ± 0.50 a
Sodium (Na)	1.84 ± 0.04 ab	1.07 ± 0.04 c	1.73 ± 0.04 b	1.91 ± 0.04 a
Zinc (Zn)	21.70 ± 0.72 c	22.38 ± 0.72 c	35.08 ± 0.72 b	70.18 ± 0.72 a
Copper (Cu)	24.89 ± 0.12 d	30.74 ± 0.12 c	40.84 ± 0.12 b	60.41 ± 0.12 a
Molybdenum (Mo)	1.23 ± 0.21 c	1.86 ± 0.21b c	2.36 ± 0.21 ab	2.73 ± 0.21 a

*Data are expressed as mean ± standard deviation of three repetitions. Significant differences ($p \leq 0.05$) among treatments are indicated with different letters. ^sComposition of macrominerals (g kg⁻¹): P, K, Ca, Mg, and S. ^{ss}Composition of microminerals (mg kg⁻¹): Fe, B, Mn, Na, Zn, Cu, and Mo. T1: control; T2: 2.0 g L⁻¹ NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ NaCl; and T4: 3.0 g L⁻¹ NaCl.

and T1 showed the lowest levels of this microelement, and were statistically similar to each other. The lowest value of Na was observed in T2, while the other treatments were similar to each other. Zn showed higher concentrations as the salinity level increased in the medium, although T2 was statistically similar to T1 (control). For Cu, statistically different means were observed for each of the treatments tested, with the highest concentration of this element observed in T4. The same trend was observed in Mo, with the highest concentration recorded in T4.

The total content of minerals in *A. maxima* could be attributed to the biosorption capacity that the cyanobacterium presents towards metal ions, and to the pH of the culture medium; since it intervenes in the solubility of the metal, as well as in the degree of dissociation of the functional groups contained in the cell wall of cyanobacteria (Michalak *et al.*, 2019).

The biomass of *A. fusiformis* produced in a profitable nutrient medium (commercial fertilizer NPK10-20-20, sodium bicarbonate NaHCO_3 and NaCl at a concentration of 18 and 1 g L⁻¹ respectively) showed higher Na and P content; while cultures in Zarrouk medium presented higher concentrations of Ca, Mn, Mg, Fe, and Zn, with the nutrient medium and tap water being the main factors related to the mineral composition (Michael *et al.*, 2019). The levels of Ca and P found in *A. platensis* are the results of the differentiated cell metabolism of cyanobacteria (Alvarenga *et al.*, 2011).

In this study, mineral concentrations of the samples of *A. maxima* cultivated with different NaCl concentrations were observed to be higher than in other reports, which shows the great potential of this microorganism to grow in the tropical conditions of the region of Cordoba, Veracruz, Mexico, offering an important source of nutrients that complements the mineral requirements in the human diet.

Concentration of photosynthetic compounds

Under salinity conditions such as those established in this study, it is possible to observe damage to the photosynthesis process, both a structural and functional level. The analyses showed that the chlorophyll-*a* content was affected under saline stress conditions; T1 and T2 were statistically higher than T3 and T4, with significant differences between them ($p \leq 0.001$). The levels of phycocyanin (PC) showed a negative relationship with the NaCl concentration in the nutrient medium; obtaining a maximum value without significant differences in T1 and T4 with values of 43.46 ± 0.14 and 43.23 ± 0.14 mg g⁻¹, respectively. However, T2 and T3 had lower PC values with significant differences between them and with the rest of the treatments (Figure 3B).

In the powdered biomass of *A. platensis*, the amount of chlorophyll-*a* was affected when applying 35.06 g L⁻¹ NaCl. Meanwhile, PC levels increased to 23.37 g L⁻¹ NaCl, and at 35.06 g L⁻¹ no damage was reported in PC production under laboratory conditions (Liu *et al.*, 2016). In this study, the results obtained for chlorophyll-*a* and PC of powdered *A. maxima* were not influenced by the concentrations of NaCl added to the nutrient medium (Figure 3). The concentration of photosynthetic pigments depends to a large

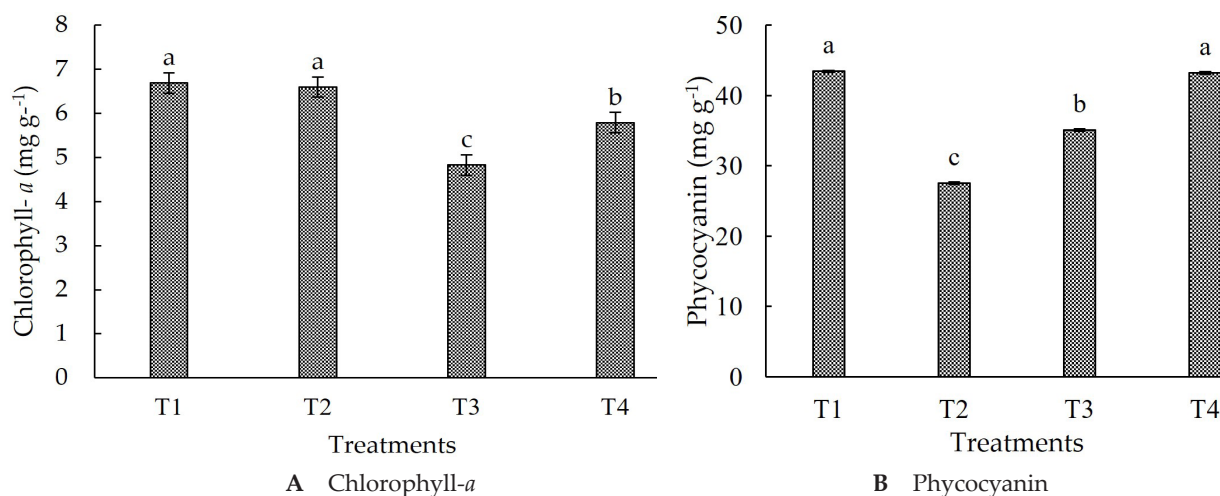


Figure 3. Pigment content in the powdered biomass of *Arthrospira maxima* cultivated in different NaCl concentrations under tropical conditions in the region of Cordoba, Veracruz, Mexico. A: chlorophyll-a; B: phycocyanin (FC). T1: control; T2: 2.0 g L⁻¹ NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ NaCl; and T4: 3.0 g L⁻¹ NaCl.

extent on other factors such as available nutrients, irradiance, and light-harvesting capacity (Ajayan *et al.*, 2012).

Infrared Spectroscopy (FTIR)

The FTIR spectra of T1, T2, T3, and T4 showed similarity among the absorption bands of functional groups associated with the presence of proteins, carbohydrates, lipids, and nucleic acids (Figure 4). Outstanding in the protein region were amide I at 1647

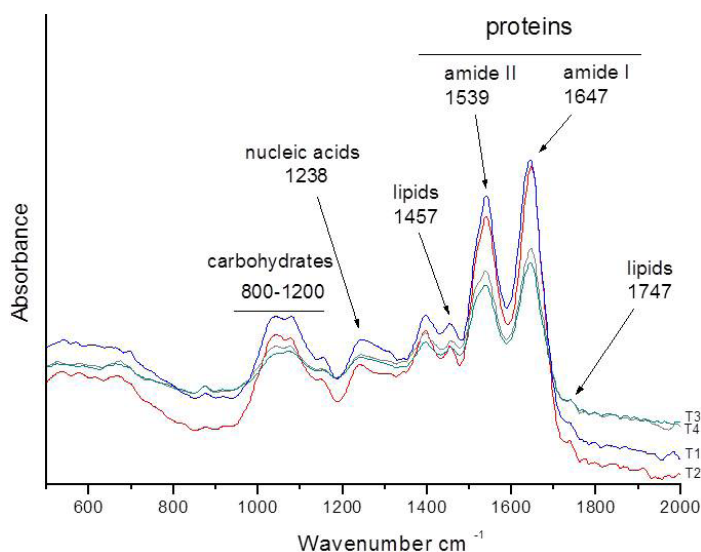


Figure 4. FTIR spectra in the powdered biomass of *Arthrospira maxima* cultivated in different NaCl concentrations under tropical conditions in the region of Cordoba, Veracruz, Mexico. T1: control; T2: 2.0 g L⁻¹ NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ NaCl; and T4: 3.0 g L⁻¹ NaCl in the region of 500 to 2000 cm⁻¹.

cm^{-1} associated with the C=O bond and amide II at 1539 cm^{-1} NH bond. Lower intensity bands were observed in the region of $1200 - 800 \text{ cm}^{-1}$ corresponding to the C-O-C and C-O bonds associated with the presence of carbohydrates. The presence of lipids was confirmed by bands at 1457 and 1747 cm^{-1} associated with CH_3 and C=O bonds. These results are similar to those reported by Lupatini-Menegotto *et al.* (2019) for *A. platensis*. On the other hand, the FTIR analysis indicates that the treatments were influenced by the salinity of the medium, highlighting this effect in the protein region where a decrease in absorption is seen in the amide I and II bands concerning to T1, related with a decrease in protein concentration observed in the proximal analysis (Table 1).

Antioxidant activity

The values of antioxidant activity in the powder obtained from *A. maxima* exposed to different NaCl concentrations show a positive relationship between antioxidant activity and NaCl levels; that is, at a higher concentration of NaCl, a higher antioxidant activity was recorded (Figure 5). At T4, the antioxidant activity was statistically higher ($35.61 \pm 2.21 \%$) than the rest of the treatments. The minimum activity ($15.98 \pm 2.21 \%$) was obtained at T1 (Figure 5). Coincidentally, the *A. platensis* strains exerted high antioxidant activity at 23.37 and 35.06 g L^{-1} NaCl (Liu *et al.*, 2016). On the other hand, when the NaCl concentration is higher than 35.06 g L^{-1} , the antioxidant activity decreases. A higher antioxidant activity has been observed in *A. platensis* exposed to saline stress in a pH range from $7.5 - 11.0$, compared to those cultivated under normal conditions and with a pH closer to neutrality (Ismaiel *et al.*, 2016).

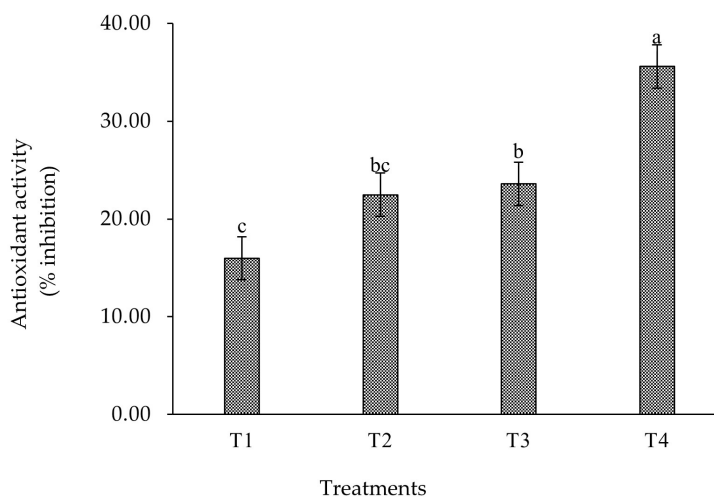


Figure 5. Antioxidant activity of the powdered biomass of *Arthrospira maxima* cultivated in different NaCl concentrations under tropical conditions in the region of Cordoba, Veracruz, Mexico. T1: control; T2: 2.0 g L^{-1} NaCl; T3: 2.5 g L^{-1} NaCl; and T4: 3.0 g L^{-1} NaCl.

The results obtained in this study are similar to those reported previously. The antioxidant activity of *A. maxima* is not only associated with the presence of phycocyanin and allophycocyanin; but with richness in insulin-like proteins, fatty acids (sulpholipids), and sulphated polysaccharides (Wan *et al.*, 2016). It should be noticed that the powdered biomass of *A. maxima* evaluated in this study presents an excellent source of minerals, which are associated with the antioxidant and chelating activity provided by this cyanobacterium (Martínez-Palma *et al.*, 2015).

CONCLUSIONS

Under the experimental conditions of this study, the addition of NaCl to the nutrient medium of *Arthrospira maxima* did not significantly affect cell growth, nor did it modify the morphology of the filaments or the content of photosynthetic compounds. However, the high concentration of salts decreases the concentrations of proteins and minerals. Therefore, the physical and chemical characterization showed that the powdered biomass of *A. maxima* cultivated under different NaCl concentrations in the tropical climate conditions of the region of Cordoba, Veracruz, Mexico has nutritional properties with the potential to be used as a food source for human consumption or as a functional ingredient in the development of innovative biotechnological products.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the Universidad Iberoamericana de Puebla for the facilities provided and to the Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa in Mexico City for donating the strain of *A. maxima* used in this research. To the Master of Science Program in Sustainable Agrifood Innovation and the LGAC 2 of the Colegio de Postgraduados Campus Córdoba; as well as the National Council of Science and Technology (CONACYT) for their support to this research.

REFERENCES

- Ajayan KV, Selvaraju M, Thirugnanamoorthy K. 2012. Enrichment of chlorophyll and phycobiliproteins in *Spirulina platensis* by the use of reflector light and nitrogen sources: An in-vitro study. *Biomass Bioenergy* 47: 436-441. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.012>
- Alcántar GG, Sandoval VM. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Publicación especial No. 10. Chapingo, México.
- Ribeiro A R, Borges R P, de Souza C V, Zangeronimo MG, da Silva Jr JW, da Silva LR, Moreira S L, Pereira LJ. 2011. Energy values and chemical composition of spirulina (*Spirulina platensis*) evaluated with broilers. *Revista Brasileira de Zootecnia* 40 (5): 992-996. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000500008>
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Journal of Food Science and Technology* 28 (1): 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Bremner JM. 1965. Inorganic Forms of Nitrogen. In *Methods of Soil Analysis*, A.G. Norman (Ed.). 1149-1178. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c33>
- Bryant DA, Guglielmi G, de Marsa NT, Castets AM, Cohen-Bazire G. 1979. The structure of cyanobacterial phycobilisomes: a model. *Archives of Microbiology* 123: 113-127. <https://doi.org/10.1007/BF00446810>
- da Silva SC, Fernandes IP, Barros L, Fernandes Â, Alves MJ, Calhella RC, Pereira C, Barreira JCM, Manrique Y, Colla E, Ferreira ICFR, Filomena BM. 2019. Spray-dried *Spirulina platensis* as an effective ingredient to improve yogurt formulations: Testing different encapsulating solutions. *Journal of Functional Foods* 60: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103427>

- Desmorieux H, Madiouli J, Herraud C, Mouaziz H. 2010. Effects of size and form of *Arthrospira spirulina* biomass on the shrinkage and porosity during drying. *Journal of Food Engineering* 100 (4): 585–595. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.021>
- Harborne JB. 1973. *Phytochemical methods: a guide to modern techniques of plant analysis*. Chapman and Hall Ltd, London. 278 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5570-7>
- Huarachi-Olivera R, Yapo-Pari Ú, Dueñas-Gonza Á, González-Juárez R, Condori-Huamanga J, Pacheco-Salazar DG, Soto-Flores J. 2015. Adaptabilidad de *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis* (Cyanophyta) en fotobiorreactor tubular cónico bajo condiciones ambientales. *Idesia* (Arica) 33 (1): 103–112. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000100011>
- Ismail MMS, El-Ayouty YM, Piercey-Normore M. 2016. Role of pH on antioxidants production by *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis*. *Brazilian Journal of Microbiology* 47 (2): 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.01.003>
- Kebeish R, El-Ayouty Y, Hussein A. 2014. Effect of Salinity on Biochemical Traits and Photosynthesis-Related Gene Transcription in *Chlorella vulgaris*. *Egyptian Journal of Botany* 54 (2): 281–294. https://ejbo.journals.ekb.eg/article_492.html (Recuperado: mayo 2021).
- Liu C, Lu-Jia L, Chun-Yuan W, Kang-Ning G, Jian-Hong L. 2016. Growth and antioxidant production of *Spirulina* in different NaCl concentrations. *Biotechnology Letters* 38: 1089–1096. <https://doi.org/10.1007/s10529-016-2087-2>
- Lupatini-Menegotto AL, de Souza LES, Colla LM, Costa JAV, Sehn E, Bittencourt PRS, de Moraes Flores EL, Canan C, Colla E. 2019. Investigation of techno-functional and physicochemical properties of *Spirulina platensis* protein concentrate for food enrichment. *Journal of Food Science Technology* 114: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108267>
- Martínez-Palma N, Martínez-Ayala A, Dávila-Ortiz G. 2015. Determination of antioxidant and chelating activity of protein hydrolysates from *Spirulina* (*Arthrospira maxima*) obtained by simulated gastrointestinal digestion. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 14 (1): 25–34. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62037106003.pdf> (Recuperado: enero 2021).
- Mehar J, Shekh A, Nethravathy MU, Sarada R, Chauhan VS, Mudliar S. 2019. Automation of pilot-scale open raceway pond: A case study of CO₂-fed pH control on *Spirulina* biomass, protein and phycocyanin production. *Journal of CO₂ Utilization* 33: 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.07.006>
- Michael A, Kyewalyanga MS, Lugomela CV. 2019. Biomass and nutritive value of *Spirulina* (*Arthrospira fusiformis*) cultivated in a cost-effective medium. *Annals Microbiology* 69: 1387–1395. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01520-4>
- Michalak I, Mironiuk M, Godlewska K, Trynda J, Marycz K. 2019. *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*: An effective biosorbent for nutrients. *Process Biochemistry* 88: 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.10.004>
- Mutawie H. 2015. Growth and metabolic response of the filamentous cyanobacterium *Spirulina platensis* to salinity stress of sodium chloride. *Life Science Journal* 12 (5): 71–78. http://www.lifesciencesite.com/ljs/life120515/008_28716life120515_71_78.pdf (Recuperado: marzo 2021).
- Ogbonda KH, Aminigo RE, Abu GO. 2007. Influence of temperature and pH on biomass production and protein biosynthesis in a putative *Spirulina* sp. *Bioresource Technology* 98 (11): 2207–2211. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.028>
- Rafiqul IM, Hassan A, Sulebele G, Orosco CA, Roustaiian P, Jalal KCA. 2003. Salt stress culture of blue-green Algae *Spirulina fusiformis*. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 6: 648–650. <https://scialert.net/abstract/?doi=pjbs.2003.648.650> (Recuperado: marzo 2021).
- Rosińska J, Kozak A, Dondajewska R, Goldyn R. 2017. Cyanobacteria blooms before and during the restoration process of a shallow urban lake. *Journal of Environmental Management* 198: 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.091>
- Soni RA, Sudhakar K, Rana RS. 2017. *Spirulina* – From growth to nutritional product: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 69: 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.09.010>
- Stramarkou M, Papadaki S, Kyriakopoulou K, Krokida M. 2017. Effect of drying and extraction conditions on the recovery of bioactive compounds from *Chlorella vulgaris*. *Journal of Applied Phycology* 29: 2947–2960. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1181-8>
- Sujatha K, Nagarajan P. 2014. Effect of salinity on biomass and biochemical constituents of *Spirulina platensis*. *International Journal of Plant Protection* 7: 71–73. https://www.researchgate.net/profile/Sujatha-Kandasamy/publication/303812497_Effect_of_salinity_on_biomass_and_biochemical_constituents_of_Spirulina_platensis_Geitler/links/5755124408ae02ac128119ac/Effect-of-salinity-on-biomass-and-biochemical-constituents-of-Spirulina-platensis-Geitler.pdf (Recuperado: abril 2021).

- Velázquez RSR, Sosa ME, Ramírez GME, Pro MA, Suárez LR, Ávila RF, Hernández CAS, Narciso G.C., Rodríguez C.J.C. 2014. Genotipo, alimento y refrigeración, en la actividad antioxidante y estabilidad oxidativa del lomo de conejo. *Archivos de Zootecnia* 63 (243): 531-542. <https://dx.doi.org/10.4321/S0004-05922014000300013>
- Vonshak A, Boussiba S, Abieliovich A, Richmond A. 1983. Production of *Spirulina* biomass: Maintenance of monoalgal culture outdoors. *Biotechnology and Bioengineering* 25 (2): 341-349. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18548655/> (Recuperado: abril 2021).
- Wan D, Wu Q, Kuča K. 2016. *Spirulina*. In *Nutraceuticals: Efficacy, safety and toxicity* (2nd. Edition), Academic Press; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. pp: 959-974. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821038-3.00057-4>

EFEECTO DE LA CONCENTRACION DE NaCl EN LA PRODUCCION DE *Arthrospira maxima* CULTIVADA EN EL TRÓPICO HÚMEDO

Baruc Fernández-Corte¹, Aleida Selene Hernández-Cázares¹, Fernando Carlos Gómez-Merino¹,
Ramón de Cangas³, Mónica Rodríguez-Palacio⁴, Oscar García-Gómez⁵, María Antonieta Ríos-Corripio^{2*}

¹ Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

² CONACYT-Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

³ Fundación Alimenta Tu Salud - Calle Uria 38 - 4 A, Oviedo, Asturias, España. C. P. 33003.

⁴ Laboratorio de Ficología Aplicada AS 202. Departamento de Hidrobiología. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa, Ciudad de México. C. P. 09340.

⁵ Ingeniería Química e Ingeniería en Biotecnología. Universidad Iberoamericana Puebla. San Andrés Cholula, Puebla, México. C. P. 72810.

* Corresponding author: rios.antonietta@colpos.mx

RESUMEN

La producción de biomasa microbiana puede ser afectada por la composición del medio de cultivo, entre ellas el contenido de sales y en cuanto a la concentración del NaCl se tiene poca información al respecto, por lo que en el presente estudio se evaluó el efecto de la adición de diferentes concentraciones de NaCl (0.0, 2.0, 2.5 y 3.0 g L⁻¹) en un medio Jourdan sobre el crecimiento celular y las propiedades físicas y químicas de *Arthrospira maxima* cultivada en la región de Córdoba-Veracruz, México. El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial (AxB). Durante la fase de producción se evaluó el crecimiento celular y la morfología de los filamentos, y posterior a la cosecha se realizó el análisis físico y químico de *A. maxima* (humedad, fibra cruda, contenido total de proteína y lípidos, composición mineral, compuestos fotosintéticos, actividad antioxidante y composición estructural por análisis de Espectroscopia/FTIR). Los resultados obtenidos muestran que la adición de NaCl no afectó el desarrollo celular, la morfología de los filamentos y el contenido de compuestos fotosintéticos. La máxima tasa de producción de biomasa en todos los tratamientos fue al 6 d, sin diferencias significativas ($p > 0.05$) entre tratamiento. En todos los tratamientos, *A. maxima* mostró concentraciones adecuadas de proteína y minerales; así como actividad antioxidante. Los espectros FTIR mostraron bandas de absorción asociadas a proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos. Se observó una disminución de las bandas amida I y amida II de las proteínas con la adición de NaCl. Se concluye que, la *A. maxima* cultivada en estas condiciones climáticas tropicales cuenta con excelentes propiedades para ser aprovechada como ingrediente funcional en el desarrollo de productos alimentarios innovadores y biotecnológicos para consumo humano.

Palabras claves: antioxidante, *Arthrospira maxima*, cianobacteria, NaCl, producción, proteína.

Citation: Fernández-Corte B, Hernández-Cázares AS, Gómez-Merino FC, de Cangas R, Rodríguez-Palacio M, García-Gómez O, Ríos-Corripio MA. 2022. Effect of NaCl concentration on the production of *Arthrospira maxima* cultivated in the humid tropics. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2735>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 29, 2021.
Approved: March 15, 2022.
Estimated publication date:
March 16, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 151-180.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non- Commercial
4.0 International license.



INTRODUCCIÓN

Espirulina es el nombre con el que se conoce un grupo de especies del género *Arthrospira*, constituido por cianobacterias fotosintéticas con filamentos en forma de espiral (Wan *et al.*, 2016). Este grupo de cianobacterias aporta alrededor del 55-70% de proteína en peso seco; además de contener otros nutrientes como hidratos de carbono (15-25 %), lípidos (5-6 %), vitaminas (pro-vitamina A, ácido ascórbico, tocoferol y vitaminas del complejo B), ácidos nucleicos (6-13%), pigmentos (ficocianina, clorofila y carotenoides) y minerales (calcio, magnesio, potasio, hierro, fósforo, manganeso, cobre, sodio y selenio) (Wan *et al.*, 2016). Debido a sus propiedades y características, diferentes áreas de producción se han enfocado en aprovechar estas cianobacterias con el fin de desarrollar nuevos productos innovadores para el bienestar social (Mehar *et al.*, 2019).

El crecimiento de estos microorganismos está influenciado por factores como la solución nutritiva, cantidad de cepa inicial, pH, temperatura y luz solar (Ogbonda *et al.*, 2007). De forma natural, las especies del género *Arthrospira* crecen en aguas sumamente alcalinas ($<30 \text{ g L}^{-1}$) con un pH de alrededor de 8.5-11.0, mientras más alto sea el pH y la conductividad del agua, mayor es la supervivencia de estos organismos (Wan *et al.*, 2016). Para su cultivo, las soluciones nutritivas deben contener un adecuado nivel de sales a fin de alcanzar valores óptimos de pH y conductividad eléctrica (Mutawie, 2015). En el mercado actual existen diferentes medios nutritivos formulados de acuerdo con las condiciones de crecimiento de cultivo (Soni *et al.*, 2017). Sin embargo, un desbalance en la concentración óptima de sales minerales puede afectar negativamente la producción, siendo los nitratos y los cloruros los de mayor impacto en la inducción de estrés osmótico (Vonshak *et al.*, 1983).

Gracias a diferentes mecanismos desarrollados a través de la evolución, las cianobacterias del género *Arthrospira* pueden adaptarse al estrés, a través de ajustes morfológicos, fisiológicos y bioquímicos que originan saturación de solutos y metabolitos orgánicos (Sujatha y Nagarajan, 2014). Todos estos ajustes osmóticos ocasionan que las estructuras subcelulares estén protegidas y que algunas enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD), polifenol oxidasa (PPO), peroxidasa (POD) y catalasa (CAT) disminuyan el daño oxidativo causado por radicales libres, provocado por los niveles altos de salinidad (Kebeish *et al.*, 2014).

Dentro del género *Arthrospira* se describen cerca de 40 especies, una de las cuales es *A. maxima*, la cual ha sido cultivada por cientos de años en la cuenca del lago de Texcoco, México, en condiciones de climas templado, y pocos trabajos se han desarrollado para la evaluación de su desempeño en climas tropicales. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la adición de diferentes concentraciones de NaCl sobre las propiedades físicas y químicas de la *A. maxima* cultivada en la región tropical de Córdoba, Veracruz, México. La hipótesis que se busca comprobar es que esta especie se puede cultivar en las condiciones de clima tropical de Córdoba, Veracruz, y que la salinidad inducida por la adición de NaCl modifica su metabolismo y la concentración de biomoléculas y compuestos bioactivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del fotobiorreactor

Para evaluar el crecimiento y producción de biomasa de *A. maxima* en condiciones de clima tropical húmedo, se implementó un fotobiorreactor de diseño propio y bajo costo. Este fotobiorreactor está compuesto por: 1) un contenedor de plástico (con capacidad de 3 L) translúcido de 25.5 cm de alto x 13.3 cm de largo x 11.5 cm de ancho, que permite que la luz solar incide en las células y facilita así la fotosíntesis; 2) un sistema de aeración, empleando una bomba de aire (Hagen, Elite 802; China) con capacidad de 75 L h⁻¹ para la oxigenación del medio de cultivo.

Condiciones de cultivo

La cepa de *A. maxima* usada en el experimento, fue donada por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Iberoamericana de Puebla, y la Universidad Autónoma Metropolitana Campus Iztapalapa, México. El cultivo de *A. maxima* se estableció a la intemperie en un invernadero de malla sombra, con temperatura y radiación solar promedio durante el año de 30 °C y 759 w m⁻² respectivamente ubicado en el campo experimental del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Veracruz, México, localizado a 18° 51' 24" de latitud al norte, a 96° 51' 47" de longitud oeste, a 645 m de altitud

Las células se inocularon en un medio alcalino Jourdan a una concentración de 2.16x10³ células mL⁻¹, (previo conteo de células con el uso de la cámara Sedgewick Rafter) bajo la siguiente composición (por litro de agua purificada): 2 g KNO₃, 8 g NaHCO₃, 0.2 g MgSO₄, 0.1 g NaH₂PO₄, y 0.1 g FeSO₄. Todos los componentes se mezclaron en agua sin cloro. Para evaluar el efecto de NaCl se establecieron lotes de cultivo, por triplicado, a diferentes concentraciones de la sal: 2.0 (T2), 2.5 (T3) y 3 (T4) g L⁻¹ NaCl, y un cultivo testigo (T1) sin la adición de NaCl. Cada unidad experimental de 3 L se inoculó con una solución madre de células de *A. maxima* de 2 L, previamente adaptada.

Producción de biomasa

El crecimiento celular y la morfología de *A. maxima* se evaluó según el método establecido por Huarachi-Olivera *et al.* (2015), usando un microscopio óptico (Carl Zeiss, Primo Star Fixed-Köhler HAL/LED; White Plains, NY, EE. UU.) con un lente objetivo de 10x. Una muestra de cada tratamiento se extrajo cada 72 h durante 12 d. Las células de *A. maxima* se preservaron con solución Lugol durante 24 h, siguiendo el método de Rosińska *et al.* (2017) y posteriormente se procedió a realizar el conteo de células con el uso de la cámara Sedgewick Rafter. La densidad celular (D) se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$D \text{ (cel mL}^{-1}\text{)} = \frac{\text{número de cel. contadas}}{\text{número de celdas contadas}} \times \frac{1000 \text{ celdas}}{1 \text{ mL}} \quad (1)$$

Obtención de biomasa

La recolección de biomasa se llevó a cabo a los 12 d, mediante el método de filtrado (tela de 40 micras, 200 hilos cm^{-3}) de un 1/3 del volumen del medio cultivo. La biomasa se lavó con agua destilada, a fin de retirar el exceso de sales nutritivas, se deshidrató en un secador de aire caliente (Excalibur, 2900ECB; Sacramento, CA, EE. UU.) a 45 °C durante 4 h con el propósito de preservar los componentes más lábiles, según el método descrito por Desmorieux *et al.* (2010). La materia resultante se molió en un procesador de alimentos (Nutribullet, NB-101B; Hong Kong, China). Las muestras secas se envasaron en bolsas de cierre hermético y se almacenaron a temperatura ambiente hasta su análisis.

Análisis físico y químico

La humedad y el contenido de fibra cruda de la *A. maxima* en polvo se determinó con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-F-083-1986 (<https://studylib.es/doc/5465578/nmx-f-083-1986.-alimentos.-determinaci%C3%B3n-de-humedad-en>) y la Norma Mexicana NMX-F-090-S-1978 (http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4799842&fecha=27/03/1979), respectivamente.

El contenido de proteína se realizó con base a lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-F-068-S-1980 método Kjeldahl (http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4858024&fecha=04/08/1980). El porcentaje de proteína se obtuvo multiplicando el porcentaje de nitrógeno por el factor 6.25. El contenido de lípidos totales se evaluó de acuerdo con la norma NMX-F-089-S-1978 (http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=678206&fecha=21/05/2004), según la técnica Soxhlet modelo EXTRACTION-06C, usando éter de petróleo para la extracción.

Para la determinación de la concentración mineral de la *A. maxima*, el polvo obtenido se secó a 72 °C durante 48 h en una estufa de aire forzado para remover la captación de humedad de la muestra (Riossa HCF-125; Guadalajara, México), y se trituro hasta obtener un tamaño de partícula de 2 mm. El contenido de nitrógeno total (N) se determinó por el método Kjeldahl (Bremner, 1965). La muestra se colocó en un digestor, con una solución de $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$ en H_2SO_4 a una concentración de 3.3 %. Para la determinación de las concentraciones de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B se realizó una digestión ácida de la muestra seca y molida con $\text{HNO}_3\text{:HClO}_4$ (2:1, v/v), según el método descrito por Alcántar y Sandoval (1999), y para su determinación se utilizó un espectrofotómetro de emisión óptica de inducción por plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, EE. UU.).

Determinación de compuestos fotosintéticos

La clorofila-*a* se evaluó de acuerdo con el método descrito por Harborne (1973) con algunas modificaciones. Una muestra de 0.25 g de *A. maxima* pulverizada se homogeneizó con 10 mL de acetona al 80%, se agitó en un vortex durante 1 min, y se incubó a 4 °C durante 24 h en oscuridad. Del volumen total se tomaron 5 mL y se centrifugó a 9391 g por 10 min. Del sobrenadante se tomaron 0.5 mL y se aforó a 10 mL con agua

destilada para ser medidas a una longitud de onda de 663 nm y 645 nm con un espectrofotómetro UV - Visible (Thermo Scientific, GENESYS 10S; Madison, WI, EEUU). La concentración de clorofila-*a* fue calculada con la ecuación 2.

$$\text{Clorofila } a \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{12.70 (A_{663}) - 2.59 (A_{645})}{\text{Peso seco (g)}} \quad (2)$$

La ficocianina (FC) se determinó siguiendo la metodología establecida por Bryant *et al.* (1979) con algunas modificaciones. Una muestra de 0.25 g de *A. maxima* pulverizada se homogeneizó con 10 mL de solución amortiguadora de fosfato de potasio (50 mM, pH 6.8). Posteriormente, se sometió a congelación a -80 °C por 48 horas, luego se descongelaron para ser centrifugadas a 9391 g durante 15 min. Finalmente, del sobrenadante se tomaron 0.5 mL, se aforó a 10 mL con agua destilada y se midió la absorbancia a 615 y 652 nm en un espectrofotómetro UV-Visible (Thermo Scientific, GENESYS 10S; Madison, WI, EEUU). La concentración de FC se calculó con la ecuación 3.

$$\text{FC (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{(A_{615} - 0.474 (A_{652}))}{5.34} \quad (3)$$

Espectroscopia FTIR

La composición estructural de la *A. maxima* se determinó con un Espectrofotómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) (Bruker, Vertex; Billerica, MA, EE. UU.) por el método de Reflectancia Total Atenuada (ATR). Los espectros de cada tratamiento se obtuvieron por triplicado y se promediaron. Se utilizaron 64 barridos con una resolución de 4 cm⁻¹ en la región espectral de 4000-400 cm⁻¹. Para el análisis de los espectros se utilizó el programa Origin 6.1 (OriginLab Corporation; Northampton, MA, EE. UU.).

Actividad Antioxidante

La actividad captadora del extracto acuoso de *A. maxima* y el 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) se determinó con base al método descrito por Brand-Williams *et al.* (1995). El extracto acuoso de cada tratamiento de la *A. maxima* pulverizada se preparó de acuerdo con el método descrito por Velázquez *et al.* (2014), con algunas modificaciones. Una muestra de 0.25 g de *A. maxima* pulverizada se mezcló con 10 mL de agua destilada, se incubó durante 30 min a temperatura ambiente y se homogeneizó con un vortex cada 10 min. Del extracto madre se tomaron 0.25 mL y se aforó con 10 mL de agua destilada. De la disolución se tomaron 2 mL, se mezclaron con 2 mL de la solución DPPH (0.0039 g·100·mL⁻¹ de etanol), se agitó vigorosamente durante 10 s, se mantuvo en oscuridad por 20 min y se midió a 517 nm con un espectrofotómetro UV - Visible (Thermo Scientific, GENESYS 10S; Madison, WI, EEUU). La actividad antioxidante se calculó utilizando la ecuación 4:

$$I(\%) = \frac{1 - A_s}{A_c} \times 100 \quad (4)$$

donde I es la inhibición (%), A_s representa la absorbancia de la muestra y A_c la absorbancia del blanco, disolución de muestra y agua sin DPPH.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial AxB; el factor A fue la concentración de NaCl añadida al medio de cultivo con cuatro niveles (0, 2.0, 2.5 y 3.0 g L⁻¹) y el factor B fue el tiempo de crecimiento con cinco niveles (0, 3, 6, 9 y 12 d). El análisis se realizó con el paquete estadístico SAS® versión (9.4). Las comparaciones de las medias fueron a través de la prueba de Tukey, con $p \leq 0.05$. La selección de esta prueba respondió a las comparaciones múltiples entre pares entre todos los tratamientos, buscando la prueba que permita un mejor control en los errores de decisión. Asimismo, la comparación de medias de los análisis químicos de *A. maxima* pulverizada se realizó mediante la prueba t de Student, con $p \leq 0.05$. El estudio se basó en esta prueba dado que el número de observaciones ($n < 30$) se ajustó mejor a una distribución t para sus análisis estadísticos. En ambas pruebas el interés fue la comparación de las medias de los pares entre todos los tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de biomasa

El crecimiento celular y la morfología de *A. maxima* cambiaron bajo concentraciones diferentes de NaCl en el medio de cultivo al momento de la cosecha (Figura 1). Las células se desarrollaron en todos los tratamientos, se observaron filamentos de tres a seis espiras, lo cual coincide con las características morfológicas de *Arthrospira* descritas por Huarachi-Olivera *et al.* (2015). Además, los caracteres morfológicos de *A. maxima* no fueron afectados por efectos de la luz solar, ya que no se presentaron filamentos lineales (Huarachi-Olivera *et al.*, 2015).

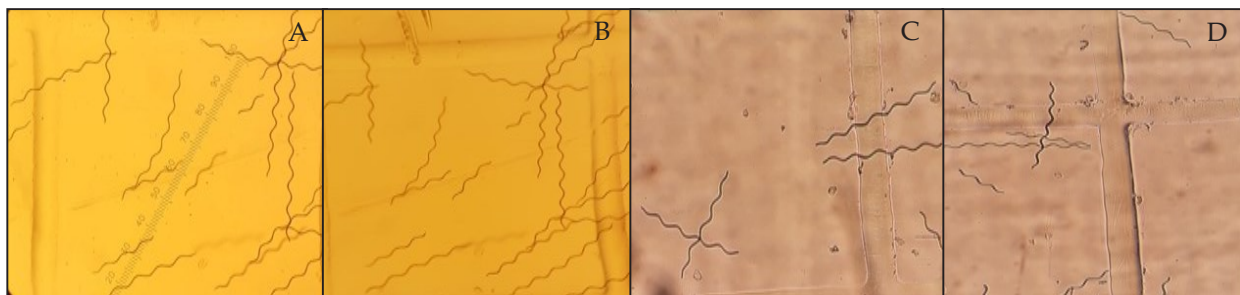


Figura 1. Filamentos de *Arthrospira maxima* cultivada bajo diferentes concentraciones de NaCl en condiciones de clima tropical de la región de Córdoba, Veracruz, México. Imágenes tomadas durante la cosecha. A) T1: testigo; B) T2: 2.0 g L⁻¹ de NaCl; C) T3: 2.5 g L⁻¹ de NaCl; y D) T4: 3.0 g L⁻¹ de NaCl.

Durante el desarrollo del cultivo (Figura 2) en todos los tratamientos se observa un crecimiento exponencial del primer al tercer día. En seguida se observa una fase estacionaria del cuarto al sexto día; en este día se alcanza la producción máxima de biomasa (3.916×10^4 células mL^{-1}), lo que indica que a partir de este punto se puede cosechar la biomasa. Por último, se observó una etapa de declinación o muerte celular. Los valores medios no mostraron diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre los tratamientos, excepto el T1 en el día 3. En estudios realizados con el medio Zarrouk para *A. platensis*, se observó un crecimiento gradual desde día 5 hasta el día 15, y un declive a partir de este día hasta el día 20 a concentraciones de 0.73, 1.41, 2.19, 2.92 y 3.65 g L^{-1} de NaCl (Mutawie, 2015). Dicho comportamiento difiere a lo reportado en este estudio, dado que no se observó una fase de latencia o adaptación de las células posiblemente como consecuencia de la capacidad de tolerancia de la cepa al medio de cultivo. Además, las condiciones experimentales fueron distintas, ya que Mutawie (2015) estableció el experimento en una cámara de cultivo instalada en laboratorio a temperatura y luz controlada. En el caso del presente estudio, el experimento estuvo a la intemperie en un invernadero de malla sombra en condiciones de clima tropical, temperaturas cálidas mayores de 18°C en la región de Córdoba, Veracruz. En condiciones controladas de laboratorio, la especie *A. platensis* es capaz de crecer a concentraciones de 23.37 y 35.06 g L^{-1} de NaCl, lo que demuestra su potencial para producirse con agua de mar (Liu *et al.*, 2016). Al crecer *A. platensis* en condiciones

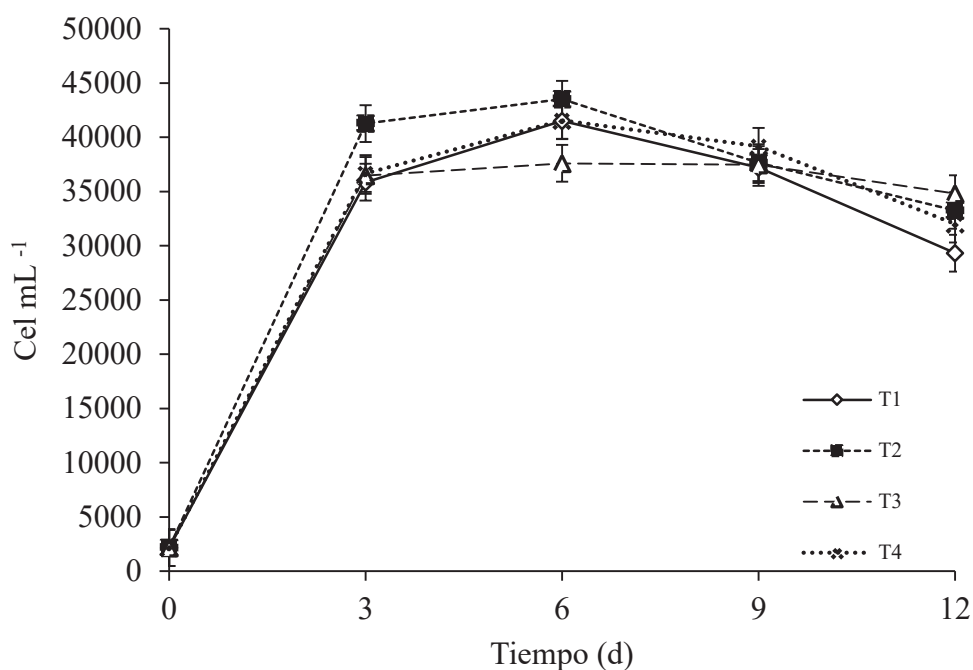


Figura 2. Curva de crecimiento de *Arthrospira maxima* cultivada bajo diferentes concentraciones de NaCl en condiciones de clima tropical de la región de Córdoba, Veracruz, México. T1: testigo; T2: 2.0 g L^{-1} de NaCl; T3: 2.5 g L^{-1} de NaCl; y T4: 3.0 g L^{-1} de NaCl.

controladas de laboratorio en medio Zarrouk con hasta 35.06 g L⁻¹ de NaCl se han observado cambios en la composición bioquímica en cuanto al contenido de biomasa, clorofila total, ficocianina y lípidos (Sujatha y Nagarajan, 2014).

Adicionalmente, el comportamiento de la tasa de crecimiento y los procesos metabólicos de la cianobacteria pudieran estar influenciados por factores como cantidad de cepa inoculada, intensidad lumínica, pH, temperatura, tipo de sistema de cultivo (fotobiorreactores en condiciones de invernadero), y no solo por la concentración de sales nutritivas (Ogbonda *et al.*, 2007).

Análisis físico y químico

Las variables físicas y químicas analizadas presentaron diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), (Cuadro 1). La humedad en todos los tratamientos mostró diferencias significativas. El T1 fue el que obtuvo los niveles más altos ($p \leq 0.0001$), en comparación con el resto de los tratamientos. Esta variación en la humedad de las muestras pudiera atribuirse a factores externos, como la humedad relativa en el medio ambiente, y por el método de secado. Se sabe que la biomasa tratada con secado al aire caliente presenta una deshidratación rápida de la superficie, pero por debajo forma capas que generan humedad (Stramarkou *et al.*, 2017). No obstante, la Norma Mexicana NMX-F-508-1988 especificaciones para *Spirulina* (http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4779957&fecha=14/10/1988) establece un valor máximo de humedad del 10 %, siendo el T2 el que se encuentra por debajo de dicho valor.

El análisis de fibra cruda de la *A. maxima pulverizada* presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos (Cuadro 1). T2 y T3 mostraron el mayor porcentaje de fibra cruda con diferencias significativas entre ellos ($p \leq 0.0001$) y al resto de los tratamientos. Mientras, T1 y T4 obtuvieron el menor contenido de fibra cruda y no mostraron diferencias significativas entre ellos ($p > 0.05$), (Cuadro 1). La Norma Mexicana NMX-F-508-1988 especificaciones para *A. maxima* establece que el contenido de fibra cruda máximo permitido es de 0.9 %, de tal manera que, los valores obtenidos en este estudio son favorables se encuentran dentro del valor de referencia establecido, y por

Cuadro 1. Caracterización física y química de *Arthrospira maxima* pulverizada cultivada bajo diferentes concentraciones de NaCl en condiciones de clima tropical de Córdoba, Veracruz, México.

Tratamiento	Humedad %	Fibra cruda %	Proteína %	Grasa %
T1	12.60 ± 0.11 a	0.27 ± 0.03 c	60.66 ± 0.45 a	1.47 ± 0.07 a
T2	9.72 ± 0.11 d	0.62 ± 0.03 a	53.78 ± 0.45 b	0.92 ± 0.07 c
T3	11.94 ± 0.11 b	0.48 ± 0.03 b	46.82 ± 0.45 d	1.13 ± 0.07 bc
T4	10.84 ± 0.13 c	0.22 ± 0.03 c	50.31 ± 0.45 c	1.24 ± 0.07 ab

* Los datos son expresados como media ± desviación estándar. Las diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los parámetros se indican con letras diferentes. T1: testigo; T2: 2.0 g L⁻¹ de NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ de NaCl; y T4: 3.0 g L⁻¹ de NaCl.

lo tanto podría considerarse a la *A. maxima* como una buena fuente de fibra dietética. La concentración máxima de proteína del 60.66 % se registró en T1 a un rango de pH 10.2 – 10.5 durante 12 días. El contenido total de proteína disminuyó significativamente en los tratamientos a los que se les adicionó NaCl en el medio nutritivo. El contenido proteico más bajo se obtuvo en T3. En *A. platensis* cultivada en medio Zarrouk, la cantidad de proteína total disminuyó gradualmente al aumentar los niveles de NaCl a 0.73, 1.41, 2.19, 2.92 y 3.65 g L⁻¹, con el tratamiento testigo con el 69.33% de proteína (Mutawie, 2015). De igual manera en *A. platensis* cultivada en condiciones estándar en medio Zarrouk, el contenido de proteína fue de 65 % en muestras a pH 9.5, en comparación con las que recibieron una fuente de carbono y un testigo de pH (7.5 y 8.5) con 18.75 % y 64 % de proteína, respectivamente (Mehar *et al.*, 2019).

En este estudio, el comportamiento en los tratamientos es atribuido a la capacidad de adaptación de *A. maxima* para crecer en condiciones salinas (Mehar *et al.*, 2019). En consecuencia, los tratamientos aquí probados presentan un excelente contenido de proteína, y las condiciones climáticas tropicales prevalecientes en la región de Córdoba, Veracruz, son aptas para su cultivo; por lo tanto, cumple con el valor proteico descrito por Wan *et al.* (2016).

En el caso de los lípidos, los valores de *A. maxima* en las condiciones de cultivo establecidas se encontraron en un rango de 0.92-1.47 %. El T1 mostró el valor de lípidos más alto (1.47 %), y presentó diferencias significativas con T2 y T3. En *A. platensis* se han registrado 0.65 g de lípidos por cada 100 g en base seca de biomasa (da Silva *et al.*, 2019), un porcentaje inferior a lo reportado en esta investigación. En *A. fusiformis* sometida a estrés salino se encontró una relación directa entre el contenido de lípidos y el nivel de salinidad (Rafiqul *et al.*, 2003). En este estudio, el contenido de lípidos es inferior a lo reportado por la literatura 5-10% (Michael *et al.*, 2019). Las cianobacterias destacan por su contenido en macro y microelementos. En este estudio se observó que la incorporación de NaCl en el medio de cultivo influyó significativamente ($p \leq 0.05$) en la concentración de minerales (Cuadro 2). Se observó que a mayor concentración de NaCl en el medio nutritivo las concentraciones de P y K disminuyeron. Por lo contrario, la concentración de Ca se incrementó a medida que la dosis de NaCl en el medio nutritivo aumentó. La concentración de Mg aumentó en T2, pero se redujo al nivel del testigo en T3 y T4. El S fue similar en el testigo y T2, y disminuyó en T3 y T4.

Respecto a los microelementos, la concentración de Fe también aumentó en la misma proporción que se incrementó el nivel de NaCl en el medio de cultivo. La concentración más alta de B se observó en T4, seguida por T2 y T3; T1 presentó los niveles más bajos de este elemento. La mayor concentración de Mg se observó en T4, seguido de T3; T2 y T1 mostraron los niveles más bajos de este microelemento, y fueron estadísticamente similares entre ellos. El valor más bajo de Na se observó en el T2, mientras que los demás tratamientos fueron similares entre sí. El Zn observó mayor concentración a medida que aumentó el nivel de salinidad en el medio, aunque T2 fue estadísticamente similar al T1 (testigo). Para Cu se observaron medias estadísticamente diferentes para cada uno de los tratamientos probados, con la mayor concentración de

Cuadro 2. Composición elemental del pulverizado de *Arthrospira maxima* cultivada bajo diferentes concentraciones de NaCl en condiciones de clima tropical de la región de Córdoba, Veracruz, México.

Elementos	Tratamiento			
	T1	T2	T3	T4
Fósforo (P)	9.99 ± 0.16 a	9.23 ± 0.16 b	9.04 ± 0.16 b	8.35 ± 0.16c
Potasio (K)	6.52 ± 0.11 a	5.25 ± 0.11 b	5.41 ± 0.11 b	5.05 ± 0.11 b
Calcio (Ca)	6.77 ± 0.11 d	7.74 ± 0.11 c	12.45 ± 0.11 b	19.68 ± 0.11 a
Magnesio (Mg)	3.28 ± 0.05 b	3.67 ± 0.05 a	3.42 ± 0.05 b	3.40 ± 0.05 b
Azufre (S)	5.29 ± 0.10 a	5.11 ± 0.10 a	4.58 ± 0.10 b	4.62 ± 0.10 b
Hierro (Fe)	93,515 ± 3954.79 c	122,757 ± 3954.79 b	132,720 ± 3954.79 ab	136,384 ± 3954.79 a
Boro (B)	15.32 ± 0.15 b	14.56 ± 0.15 c	14.81 ± 0.15 c	16.51 ± 0.15 a
Manganeso (Mn)	19.39 ± 0.50 c	19.60 ± 0.50 c	24.30 ± 0.50 b	29.74 ± 0.50 a
Sodio (Na)	1.84 ± 0.04 ab	1.07 ± 0.04 c	1.73 ± 0.04 b	1.91 ± 0.04 a
Zinc (Zn)	21.70 ± 0.72 c	22.38 ± 0.72 c	35.08 ± 0.72 b	70.18 ± 0.72 a
Cobre (Cu)	24.89 ± 0.12 d	30.74 ± 0.12 c	40.84 ± 0.12 b	60.41 ± 0.12 a
Molibdeno (Mo)	1.23 ± 0.21 c	1.86 ± 0.21b c	2.36 ± 0.21 ab	2.73 ± 0.21 a

*Los datos son expresados como media ± desviación estándar de tres repeticiones. Las diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos se indican con letras diferentes. Composición de macrominerales (g kg⁻¹): P, K, Ca, Mg y S. Composición de microminerales (mg kg⁻¹): Fe, B, Mn, Na, Zn, Cu y Mo. T1: testigo; T2: 2.0 g L⁻¹ de NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ de NaCl; y T4: 3.0 g L⁻¹ de NaCl.

este elemento observada en T4. La misma tendencia se observó en Mo, con la mayor concentración registrada en T4.

El contenido total de minerales en *A. maxima* pudiera atribuirse a la capacidad de bio-sorción que la cianobacteria presenta hacia los iones metálicos, y al pH del medio de cultivo; ya que éste interviene en la solubilidad del metal, así como en el grado de disociación de los grupos funcionales contenidos en la pared celular de las cianobacterias (Michalak *et al.*, 2019).

La biomasa de *A. fusiformis* producida en un medio nutritivo rentable (fertilizante comercial NPK10-20-20, bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y NaCl a una concentración de 18 y 1 g L⁻¹ respectivamente) mostró mayor contenido de Na y P; mientras que cultivos en medio Zarrouk presentaron una concentración superior en Ca, Mn, Mg, Fe y Zn, siendo el medio nutritivo y el agua de grifo los principales factores relacionados con la composición mineral (Michael *et al.*, 2019). Los niveles de Ca y P encontrados en *A. platensis* son resultado del metabolismo celular diferenciado de las cianobacterias (Alvarenga *et al.*, 2011).

En este estudio, se observó que la concentración de minerales de las muestras de *A. maxima* cultivada a diferentes concentraciones de NaCl es superior a otros reportes, lo cual muestra el gran potencial de este microorganismo para crecer en las condiciones de clima tropical de la región de Córdoba, Veracruz, México, ofreciendo una fuente importante de nutrientes que complementa los requerimientos de minerales en la dieta humana.

Concentración de los compuestos fotosintéticos

En condiciones de salinidad como las establecidas en este estudio es posible observar daños en el proceso de fotosíntesis, tanto a nivel estructural como funcional. Los análisis revelaron que el contenido de clorofila-*a* fue afectado en condiciones de estrés salino, T1 y T2 fueron estadísticamente superiores, en comparación con T3 y T4 con diferencias significativas entre ellos ($p \leq 0.001$). Los niveles de ficocianina (FC) observaron una relación negativa con la concentración de NaCl en el medio nutritivo; obteniendo un valor máximo sin diferencias significativas en el T1 y en el T4 con valores de 43.46 ± 0.14 y 43.23 ± 0.14 mg g⁻¹, respectivamente. No obstante, el T2 y T3 tuvieron valores menores FC con diferencias significativas entre ellos y con el resto de los tratamientos (Figura 3B).

En la biomasa pulverizada de *A. platensis*, la cantidad de clorofila-*a* fue afectada al aplicar 35.06 g L⁻¹ de NaCl; mientras que, los niveles de FC aumentaron a 23.37 g L⁻¹ de NaCl, y a 35.06 g L⁻¹ no se reportó daño en la producción de FC en condiciones de laboratorio (Liu *et al.*, 2016). En este estudio, los resultados obtenidos de clorofila-*a* y FC de *A. maxima* pulverizada no estuvieron influenciados por las concentraciones añadidas de NaCl al medio nutritivo (Figura 3). La concentración de pigmentos fotosintéticos depende en gran medida de otros factores como son nutrientes disponibles, irradiancia y capacidad de captación de luz (Ajayan *et al.*, 2012).

Espectroscopia infrarroja (FTIR)

Los espectros FTIR de T1, T2, T3 y T4 presentaron similitud entre las bandas de absorción de grupos funcionales asociadas a la presencia de proteínas, hidratos de carbono, lípidos y ácidos nucleicos (Figura 4), sobresalieron en la región de las proteínas las

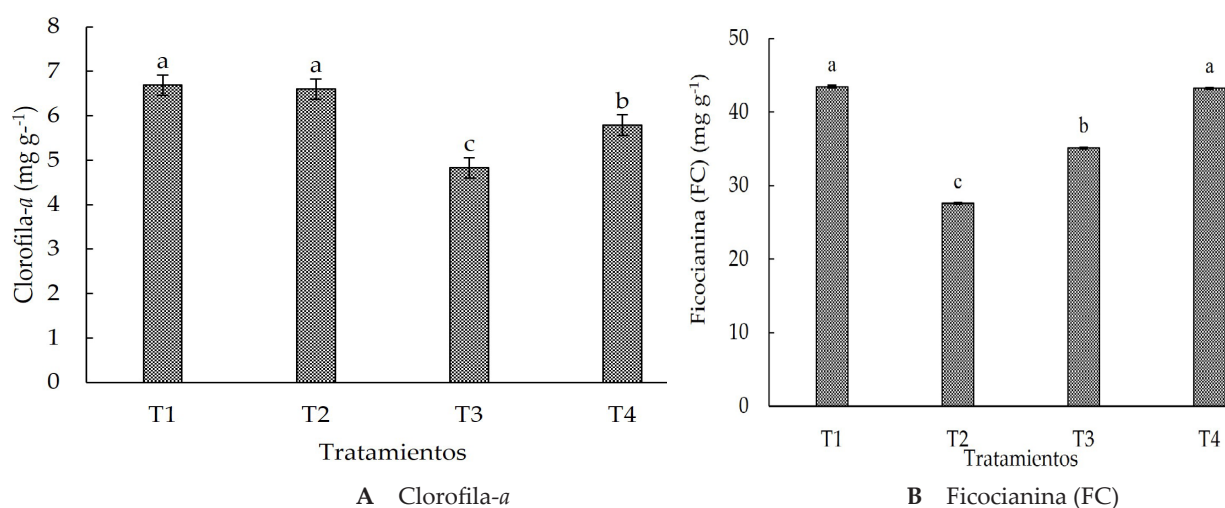


Figura 3. Contenido de pigmentos en la biomasa pulverizada de *Arthrospira maxima* cultivada bajo diferentes concentraciones de NaCl en condiciones de clima tropical de la región de Córdoba, Veracruz, México. A) Clorofila-*a*; B) Ficoianina (FC). T1: testigo; T2: 2.0 g L⁻¹ de NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ de NaCl; y T4: 3.0 g L⁻¹ de NaCl.

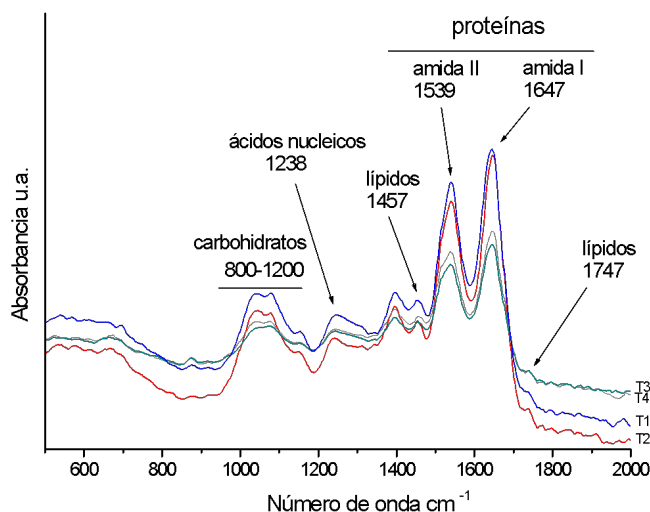


Figura 4. Espectros FTIR en la biomasa pulverizada de *Arthrospira maxima* cultivada bajo diferentes concentraciones de NaCl en condiciones de clima tropical de la región de Córdoba, Veracruz, México. T1: testigo; T2: 2.0 g L⁻¹ de NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ de NaCl; y T4: 3.0 g L⁻¹ de NaCl en la región de 500 a 2000 cm⁻¹.

bandas amida I en 1647 cm⁻¹ asociado al enlace C=O y amida II en 1539 cm⁻¹ enlace N-H. Bandas de menor intensidad se observaron en la región de 1200 - 800 cm⁻¹ que corresponden a los enlaces C-O-C y C-O asociados a la presencia de los hidratos de carbono. La presencia de lípidos se corroboró con las bandas en 1457 y 1747 cm⁻¹ asociadas a los enlaces CH₃ y C=O. Estos resultados son similares a lo reportado por Lupatini-Menegotto *et al.* (2019) para *A. platensis*. Por otra parte, el análisis FTIR indica que los tratamientos se vieron influenciados por la salinidad del medio, destacando este efecto en la región de las proteínas donde se ve una disminución en la absorción en las bandas amida I y II con respecto al T1, relacionado con una disminución en la concentración de proteína observado en el análisis proximal (Cuadro 1).

Actividad antioxidante

Los valores de la actividad antioxidante en el polvo obtenido de *A. maxima* expuesta a diferentes concentraciones de NaCl muestran una relación positiva entre la actividad antioxidante y los niveles de NaCl; es decir, a mayor concentración de NaCl se registró una mayor actividad antioxidante (Figura 5). En T4, la actividad antioxidante fue estadísticamente superior (35.61 ± 2.21 %) al resto de los tratamientos. La actividad mínima se obtuvo en T1 (15.98 ± 2.21 %), como se muestra en la Figura 5. De manera coincidente, las cepas de *A. platensis* ejercieron alta actividad antioxidante a 23.37 y 35.06 g L⁻¹ NaCl (Liu *et al.*, 2016). En cambio, cuando la concentración de NaCl es superior a 35.06 g L⁻¹, la actividad antioxidante se reduce. Se ha observado una mayor actividad antioxidante en *A. platensis* expuesta a estrés salino en un rango de pH desde

7.5-11.0, en comparación con las cultivadas en condiciones normales y con un pH más cercano a la neutralidad (Ismaiel *et al.*, 2016).

Los resultados obtenidos en este estudio son similares con lo reportado anteriormente, sin embargo, la actividad antioxidante de la *A. maxima* no solo se asocia a la presencia de ficocianina y aloficocianina, sino también a su riqueza en proteínas similares a insulina, ácidos grasos (sulfolípidos) y polisacáridos sulfatados (Wan *et al.*, 2016). Cabe destacar que la biomasa pulverizada de *A. maxima* evaluada en este estudio presenta una excelente fuente de minerales, los cuales se asocian con la actividad antioxidante y quelante que brinda esta cianobacteria (Martínez-Palma *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

En las condiciones experimentales de este estudio, la adición de NaCl en el medio nutritivo de la *Arthrospira maxima* no afectó significativamente el crecimiento celular, ni modificó la morfología de los filamentos ni el contenido de compuestos fotosintéticos. Sin embargo, la alta concentración de sales disminuye la concentración de proteínas y minerales. Por lo tanto, la caracterización física y química demostró que la biomasa pulverizada de *A. maxima* cultivada bajo diferentes concentraciones de NaCl en las condiciones de clima tropical de la región de Córdoba, Veracruz, México, cuenta con propiedades nutritivas con potencial para ser aprovechada como fuente alimentaria para consumo humano o como ingrediente funcional en el desarrollo de productos biotecnológicos innovadores.

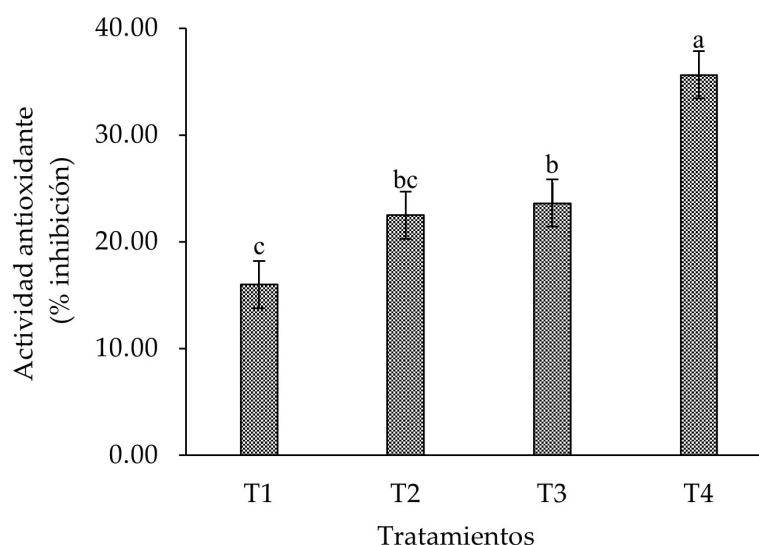


Figura 5. Actividad antioxidante de la biomasa pulverizada de *Arthrospira maxima* cultivada bajo diferentes concentraciones de NaCl en condiciones de clima tropical de la región de Córdoba, Veracruz, México. T1: testigo; T2: 2.0 g L⁻¹ de NaCl; T3: 2.5 g L⁻¹ de NaCl; y T4: 3.0 g L⁻¹ de NaCl.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Iberoamericana de Puebla por las facilidades brindadas y a la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa en la Ciudad de México, por donar la cepa de *Arthrospira maxima* utilizada en esta investigación. A la Maestría en Ciencias en Innovación Agroalimentaria Sustentable y a la LGAC 2 del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba; así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo en esta investigación.

REFERENCIAS

- Ajayan KV, Selvaraju M, Thirugnanamoorthy K. 2012. Enrichment of chlorophyll and phycobiliproteins in *Spirulina platensis* by the use of reflector light and nitrogen sources: An in-vitro study. *Biomass Bioenergy* 47: 436-441. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.012>
- Alcántar GG, Sandoval VM. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Publicación especial No. 10. Chapingo, México.
- Ribeiro A R, Borges R P, de Souza C V, Zangeronimo MG, da Silva Jr JW, da Silva LR, Moreira S L, Pereira LJ. 2011. Energy values and chemical composition of spirulina (*Spirulina platensis*) evaluated with broilers. *Revista Brasileira de Zootecnia* 40 (5): 992-996. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000500008>
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Journal of Food Science and Technology* 28 (1): 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Bremner JM. 1965. Inorganic Forms of Nitrogen. In *Methods of Soil Analysis*, A.G. Norman (Ed.), 1149-1178. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c33>
- Bryant DA, Guglielmi G, de Marsa NT, Castets AM, Cohen-Bazire G. 1979. The structure of cyanobacterial phycobilisomes: a model. *Archives of Microbiology* 123: 113-127. <https://doi.org/10.1007/BF00446810>
- da Silva SC, Fernandes IP, Barros L, Fernandes Â, Alves MJ, Calhella RC, Pereira C, Barreira JCM, Manrique Y, Colla E, Ferreira ICFR, Filomena BM. 2019. Spray-dried *Spirulina platensis* as an effective ingredient to improve yogurt formulations: Testing different encapsulating solutions. *Journal of Functional Foods* 60: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103427>
- Desmorieux H, Madiouli J, Herraud C, Mouaziz H. 2010. Effects of size and form of *Arthrospira spirulina* biomass on the shrinkage and porosity during drying. *Journal of Food Engineering* 100 (4): 585-595. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.021>
- Harborne JB. 1973. *Phytochemical methods: a guide to modern techniques of plant analysis*. Chapman and Hall Ltd, London. 278 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5570-7>
- Huarachi-Olivera R, Yapó-Pari Ú, Dueñas-González A, González-Juárez R, Condori-Huamanga J, Pacheco-Salazar DG, Soto-Flores J. 2015. Adaptabilidad de *Spirulina (Arthrospira) platensis* (Cyanophyta) en fotobiorreactor tubular cónico bajo condiciones ambientales. *Idesia (Arica)* 33 (1): 103-112. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000100011>
- Ismail MMS, El-Ayouty YM, Piercey-Normore M. 2016. Role of pH on antioxidants production by *Spirulina (Arthrospira) platensis*. *Brazilian Journal of Microbiology* 47 (2): 298-304. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.01.003>
- Kebeish R, El-Ayouty Y, Hussein A. 2014. Effect of Salinity on Biochemical Traits and Photosynthesis-Related Gene Transcription in *Chlorella vulgaris*. *Egyptian Journal of Botany* 54 (2): 281-294. https://ejbo.journals.ekb.eg/article_492.html (Recuperado: mayo 2021).
- Liu C, Lu-Jia L, Chun-Yuan W, Kang-Ning G, Jian-Hong L. 2016. Growth and antioxidant production of *Spirulina* in different NaCl concentrations. *Biotechnology Letters* 38: 1089-1096. <https://doi.org/10.1007/s10529-016-2087-2>
- Lupatini-Menegotto AL, de Souza LES, Colla LM, Costa JAV, Sehn E, Bittencourt PRS, de Moraes Flores EL, Canan C, Colla E. 2019. Investigation of techno-functional and physicochemical properties of *Spirulina platensis* protein concentrate for food enrichment. *Journal of Food Science Technology* 114: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108267>
- Martínez-Palma N, Martínez-Ayala A, Dávila-Ortiz G. 2015. Determination of antioxidant and chelating activity of protein hydrolysates from *Spirulina (Arthrospira maxima)* obtained by simulated gastrointestinal digestion. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 14 (1): 25-34. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62037106003.pdf> (Recuperado: enero 2021).

- Mehar J, Shekh A, Nethravathy MU, Sarada R, Chauhan VS, Mudliar S. 2019. Automation of pilot-scale open raceway pond: A case study of CO₂-fed pH control on *Spirulina* biomass, protein and phycocyanin production. *Journal of CO₂ Utilization* 33: 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.07.006>
- Michael A, Kyewalyanga MS, Lugomela CV. 2019. Biomass and nutritive value of *Spirulina* (*Arthrospira fusiformis*) cultivated in a cost-effective medium. *Annals Microbiology* 69: 1387–1395. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01520-4>
- Michalak I, Mironiuk M, Godlewska K, Trynda J, Marycz K. 2019. *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*: An effective biosorbent for nutrients. *Process Biochemistry* 88: 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.10.004>
- Mutawie H. 2015. Growth and metabolic response of the filamentous cyanobacterium *Spirulina platensis* to salinity stress of sodium chloride. *Life Science Journal* 12 (5): 71–78. http://www.lifesciencesite.com/lj/life120515/008_28716life120515_71_78.pdf (Recuperado: marzo 2021).
- Ogbonda KH, Aminigo RE, Abu GO. 2007. Influence of temperature and pH on biomass production and protein biosynthesis in a putative *Spirulina* sp. *Bioresource Technology* 98 (11): 2207–2211. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.028>
- Rafiqul IM, Hassan A, Sulebele G, Orosco CA, Roustaian P, Jalal KCA. 2003. Salt stress culture of blue-green Algae *Spirulina fusiformis*. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 6: 648–650. <https://scialert.net/abstract/?doi=pjbs.2003.648.650> (Recuperado: marzo 2021).
- Rosińska J, Kozak A, Dondajewska R, Goldyn R. 2017. Cyanobacteria blooms before and during the restoration process of a shallow urban lake. *Journal of Environmental Management* 198: 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.091>
- Soni RA, Sudhakar K, Rana RS. 2017. *Spirulina* – From growth to nutritional product: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 69: 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.09.010>
- Stramarkou M, Papadaki S, Kyriakopoulou K, Krokida M. 2017. Effect of drying and extraction conditions on the recovery of bioactive compounds from *Chlorella vulgaris*. *Journal of Applied Phycology* 29: 2947–2960. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1181-8>
- Sujatha K, Nagarajan P. 2014. Effect of salinity on biomass and biochemical constituents of *Spirulina platensis*. *International Journal of Plant Protection* 7: 71–73. https://www.researchgate.net/profile/Sujatha-Kandasamy/publication/303812497_Effect_of_salinity_on_biomass_and_biochemical_constituents_of_Spirulina_platensis_Geitler/links/5755124408ae02ac128119ac/Effect-of-salinity-on-biomass-and-biochemical-constituents-of-Spirulina-platensis-Geitler.pdf (Recuperado: abril 2021).
- Velázquez RSR, Sosa ME, Ramírez GME, Pro MA, Suárez LR, Ávila RF, Hernández CAS, Narciso G.C., Rodríguez C.J.C. 2014. Genotipo, alimento y refrigeración, en la actividad antioxidante y estabilidad oxidativa del lomo de conejo. *Archivos de Zootecnia* 63 (243): 531–542. <https://dx.doi.org/10.4321/S0004-05922014000300013>
- Vonshak A, Boussiba S, Abelson A, Richmond A. 1983. Production of *Spirulina* biomass: Maintenance of monoalgal culture outdoors. *Biotechnology and Bioengineering* 25 (2): 341–349. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18548655/> (Recuperado: abril 2021).
- Wan D, Wu Q, Kuča K. 2016. *Spirulina*. In *Nutraceuticals: Efficacy, safety and toxicity* (2nd. Edition), Academic Press; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. pp: 959–974. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821038-3.00057-4>



ILEAL APPARENT AND STANDARDIZED AMINO ACID DIGESTIBILITY OF SOYBEAN AND COLZA MEAL IN DIETS FOR FINISHING PIGS

Juan Edrei **Sánchez-Torres**¹, Ignacio Arturo **Domínguez-Vara**^{1*}, Luis **Castro-Bárcena**¹,
Jorge Luis **Yañez-Hernández**², Miguel **Cervantes-Ramírez**³, Ernesto **Morales-Almaraz**¹,
José Luis **Bórquez-Gastelum**¹, Daniel **Trujillo-Gutierrez**¹

¹ Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, Estado de México, México. C. P. 50090.

² Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de Tlaxcala, La Loma Xicoténcatl, Tlaxcala de Xicoténcatl, México. C. P. 90000.

³ Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México. C. P. 21705.

* Corresponding author: igy92@hotmail.com

ABSTRACT

Agri-food chains generate by-products such as soybean and colza meal for animal feed. Their nutritional value is variable and should be analysed for better quality control before their inclusion in balanced diets. The objective was to determine the content and ileal apparent and standardized digestibility of protein and amino acids (AA) of soybean (PS) and colza meal (PC) as a source of protein in diets for finishing pigs. The experimental units were arranged in a 3x3 Latin square design repeated. The treatments (T) were T1: PS+corn starch, T2: PC+corn starch, and T3: corn starch (Control), which were randomly assigned to six pigs cannulated in distal ileum (PV 75±1.2 kg). The variables were contents and apparent ileal and standardized ileal digestibility of amino acids in soybean and colza meal. To determine digestibility, chromic oxide was added to the diets. The protein and fat contents were higher in the soybean meal. Ash, crude fibre, neutral detergent fibre, acid detergent fibre, phosphorus and calcium contents were higher in the colza meal. Essential amino acid content was higher in soybean meal, but methionine was higher in colza meal. Apparent ileal digestibility (DIA) of total amino acids was similar ($p > 0.05$) among protein ingredients; but for lysine and threonine it was higher ($p \leq 0.05$) in soybean meal, except methionine. Methionine DIA was 89.78 %, 3.88 % higher ($p \leq 0.05$) in colza meal. Standardized ileal digestibility (DIE) of total amino acids was similar ($p > 0.05$) among ingredients, but lysine and threonine were higher ($p \leq 0.05$) in soybean meal. DIE was different ($p \leq 0.05$) among ingredients for all amino acids except methionine. Ileal and standardized digestibility of all amino acids were higher in soybean meal, except methionine, which was higher in colza meal. The DIA of total amino acids was similar in both protein ingredients, except lysine and threonine in soybean meal and methionine in colza meal.

Keywords: amino acids, pigs, digestibility, meals, soybean, colza.

Citation: Sánchez-Torres JE, Domínguez-Vara IA, Castro-Bárcena L, Yañez-Hernández JL, Cervantes-Ramírez M, Morales-Almaraz E, Bórquez-Gastelum JL, Trujillo-Gutierrez D. 2022. Ileal apparent and standardized amino acid digestibility of soybean and colza meal in diets for finishing pigs. *Agrociencia* <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2740>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: April 09, 2021.
Approved: March 09, 2022.
Estimated publication date:
March 25, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 181-206.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCTION

The feed and biofuel industries have increased the demand for cereal grains and oilseeds, increasing their cost and limiting their inclusion in diets for livestock species. These industries generate by-products whose chemical composition and digestibility require characterization for use in balancing and optimizing diets for swine (Woyengo *et al.*, 2014).

Swine nutrition and feeding are based on balanced diets that cover the energy and amino acid (AA) requirements according to the physiological stage of the pig; but, minimizing nitrogen (N) excretion to the environment (National Research Council - NRC, 2012). Therefore, evaluating the bioavailability of each essential amino acid is a critical aspect to assess the nutritional quality of the ingredients, as well as to estimate the requirements of AA in pigs. These studies facilitate the generation, development and exchange of information worldwide (Moughan *et al.*, 2013); three areas predominate in feeding programs on protein plant sources: amino acid digestibility, anti-nutritional factors, and metabolizable energy and net energy contents (Ruiz *et al.*, 2020).

In Mexico, soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] and colza (*Brassica napus*) seed production for oil extraction in 2016 was 510 000 Mg (Megagrams) of soybean and 4070 Mg of colza, but the national seed deficit is still significant (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - SAGARPA, 2017). Therefore, in this year, there was a greater amount of protein by-products available, and it is required to characterize their nutrients. Soybean meal (PS) and colza meal (PC) are the most important oil extraction residues; the process is performed by solvent or mechanical pressing of soybean and colza seeds. Both by-products are used in animal feed and are characterized by their high crude protein and AA content, but in colza there are higher fibre values that can affect the availability of protein and AA (NRC, 2012; Woyengo *et al.*, 2016).

The PS and PC used in swine feed in Mexico come mainly from the United States and Canada, but the content and digestibility of AA is generally unknown. Lagos and Stein (2017) showed that the apparent ileal digestibility (DIA) of protein and AA of PS produced in other countries was different. The standardized ileal digestibility (DIE) values of amino acids of PS are higher than most other plant protein sources (Berrocoso *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016a). Also, the DIE of AA from US soybean meal is higher than PS from other countries (Lagos and Stein, 2017).

Woyengo *et al.* (2016) determined the standardized ileal digestibility coefficients (DIE) of AA of four colza by-products in diets for finishing pigs, where PC (*B. juncea*) showed higher DIE of AA than that obtained from *B. napus*, therefore, it provided more digestible AA to cover the AA requirements of pigs.

In Mexico, swine nutritionists use the information on nutritional requirements generated in the country and in others. In particular, based on the NRC (2012) edition, which presents average and standard deviation values, which are products from several investigations. The information generated in this study will contribute to the construction of national databases, in the short and medium term, both of nutritional

requirements (protein and AA) of finishing pigs of the Duroc x Landrace genotype, as well as tables of chemical composition of protein feedstuffs, soybean and colza meal (AA contribution and digestibility). This tabulated information could be used to balance diets under the concept of ideal protein, with lower protein excretion in faeces and urine to the environment and higher nitrogen use efficiency of the diets supplied. The hypothesis was that PS and PC have similar apparent ileal digestibility and standardized ileal digestibility of protein and AA. The objective of the study was to determine the apparent and standardized ileal digestibility and content of protein and amino acids of two protein by-products, soybean and colza meal, in diets for finishing pigs.

MATERIALS AND METHODS

The Bioethics and Animal Welfare Committee of the Faculty of Veterinary Medicine and Animal Husbandry of the Autonomous University of the State of Mexico (Universidad Autónoma del Estado de México - UAEM) reviewed and approved the surgical, experimental and swine breeding procedures in accordance with the Official Mexican Standard NOM-062-ZOO-1999 of SAGARPA in the Mexican Federal Register (SAGARPA/Diario Oficial de la Federación - DOF, 2001).

Experimental pigs and diets

A T-type cannula was surgically inserted into the distal ileum (Cervantes *et al.*, 1999) in six castrated pigs (average PV 75 ± 1.2 kg; F1 Duroc x Landrace). The pigs were dewormed, by subcutaneous injection, with 300 μ g of ivermectin per kg body weight (1 mL per 33 kg body weight) (Ivomec Boehringer®) and were housed in individual metabolic units (1.2 x 1.2 m) that allowed them to move freely, consume the offered feed without rejection and remain clinically healthy during the entire experimental period. The cages had a plastic floor, polyvinyl chloride walls (0.9 m height), with an automatic hopper feeder and automatic drinker.

Samples of PS and PC were collected at the food plant of the Faculty of Veterinary Medicine and Animal Husbandry of the UAEM. To analyse their nutritional composition, from total batches of 5 Mg, primary samples were extracted from bags with a capacity of 50 kg ($n = 15$), then a composite sample of approximately 1 kg of each ingredient was formed, with sampling techniques described in the guide for the elaboration of statistical sampling in epidemiological surveillance programs: Microbiological and toxic residues (Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria - OIRSA, 2017).

The diets evaluated contained on dry basis (% BS) soybean meal (PS), colza meal (CP) and no nitrogen source (Table 1). The nutritional quality of PS and PC was evaluated individually (Table 2) and with the diets (Table 3). The nitrogen-free diet was used to estimate basal loss of endogenous amino acids (Nawas *et al.*, 2017). To measure digestibility, diets included 3 g kg⁻¹ chromium oxide (Cr₂O₃), as an external indigestible marker.

Table 1. Composition (g kg⁻¹ BS) of the experimental diets.

Ingredients	Experimental diets		
	Soybean meal	Colza meal	Nitrogen free
Corn starch	511.00	523.90	852.00
Soybean meal	416.00	----	----
Colza meal	----	406.00	----
Sugar	30.00	30.80	50.00
Solka floc	----	----	30.00
Colza oil	12.00	12.30	20.00
Limestone	3.00	----	10.00
Monocalcium phosphate	11.00	10.00	12.00
Salt	2.00	2.00	5.00
Vitamin premix [†]	5.00	5.00	5.00
Mineral premix [‡]	5.00	5.00	5.00
KCO ₃ , 56 % K	----	----	5.00
MgO, 58 % Mg	----	----	1.00
Chromium oxide	5.00	5.00	5.00

[†]Vitamin premix (UI g⁻¹)=vitamin A, 4,500; vitamin D₃, 800; vitamin E, 30; vitamin K₃, menadione, 1.6 mg kg⁻¹; biotin, 100 mg kg⁻¹; cyanocobalamin, 16 µg kg⁻¹; choline, 300 mg kg⁻¹; folic acid, 900 mg kg⁻¹; niacin, 16 mg kg⁻¹; pantothenic acid 10 mg kg⁻¹; pyridoxine 2.5 mg kg⁻¹; riboflavin 8 mg kg⁻¹; thiamin, 1.3 mg kg⁻¹.

[‡]Mineral premix (mg kg⁻¹)=Co, 0.65; Cu, 12; Fe, 100; I, 0.50; Mn, 35; Se, 0.25; Zn, 100.

The nutrient content of the diets was calculated (Table 2). PS and PC were the only sources of nitrogen (protein and amino acids). The diets were formulated to meet the vitamin and mineral requirements of finishing pigs (NRC, 2012).

Experimental procedure

The experiment had three stages of 7 d each; the first 5 d were to adapt the pigs to the diet, followed by 2 d to collect ileal contents. Feed intake was limited to three times the maintenance digestible energy requirement (3×110 kcal of ED kg⁻¹ PV^{0.75}; NRC, 2012), based on the metabolic body live weight of the pig at the start of each period. Feed was fed in two equal portions, at 0800 and 1500 h. The ileal contents of each pig and stage, were collected continuously from 0800 to 1800 h, homogenized and preserved frozen at -20 °C.

Sample collection, processing and analysis

The total ileal content, collected per pig and stage, were thawed and a composite sample was made; from this, 100 g were taken and dried in a Labconco FreeZone™ Freeze-Dry Systems 4.5 L 117-A65312906 (Czech, Republic). The freeze-dried diets, ingredients (PS and PC) and ileal contents were ground to a particle size of 1 mm with a mill (General Electric, 5KH39QN5525, Mexico). In diets and ingredients (Tables 2 and 3), the following were analysed: dry matter (method 930.15), crude protein (method 984.13 A-D), ether extract (method 920.39A), crude fibre (method 985.29) and

Table 2. Nutrient content (g kg⁻¹ MS) and amino acid profile (%) analyzed in the experimental diets supplied.

Variable	Experimental diets		
	Soybean meal	Colza meal	Nitrogen free
Dry Matter	892.70	896.20	886.20
Crude protein	191.00	167.70	6.60
Ether extract	29.50	29.70	23.60
Ash	33.70	42.40	39.70
Crude fibre	27.40	28.00	23.00
Phosphorus	4.70	6.20	4.70
Calcium	5.20	5.20	5.20
Total essential AA, %:			
Arginine	1.05	1.14	0.01
Histidine	0.41	0.43	0.01
Isoleucine	0.70	0.75	0.01
Leucine	1.19	1.33	0.04
Lysine	0.95	1.05	0.01
Methionine	0.18	0.27	0.01
Phenylalanine	0.78	0.79	0.02
Threonine	0.59	0.75	0.01
Valine	0.75	0.92	0.03
Total non-essential AA, %:			
Alanine	0.66	0.79	0.02
Aspartic acid	1.70	1.47	0.02
Glutamine	2.71	3.12	0.08
Glycine	0.63	0.85	0.01
Proline	0.72	1.03	0.02
Serine	0.73	0.78	0.01
Tyrosine	0.52	0.52	0.02

ash (method 942.05) according to AOAC (2012). Neutral detergent fibre (FDN) and acid detergent fibre (FDA) were determined according to Van Soest *et al.* (1991) in an ANKOM200 digester (ANKOM Technology Corporation, Fairport, NY, USA); to remove the starch present, alpha amylase was added.

The amino acid profile in ingredients, diets and ileal content was analysed in the laboratories of the experimental station of the University of Missouri, USA (method 982.30; AOAC, 2012). To measure digestibility in diets and ileal content, chromic oxide (Cr₂O₃) content was added and analyzed by spectrophotometry at 440 nm after incinerating the sample for 12 h at 450 °C (Fenton and Fenton, 1979).

Calculations

The DIA of protein and AA of the diets was calculated with the indicator method Eq. [2] $DIA = [1 - (ID \times AF) / (AD \times IF)] \times 100$. Where DIA is the ileal apparent digestibility in percent of a nutrient in the diet, ID=dietary indicator concentration (mg kg⁻¹ MS), AF=dietary nutrient concentration in ileal digesta (mg kg⁻¹ MS), AD=dietary nutrient

Table 3. Nutrient content (g kg⁻¹ MS) and amino acid profile (%) in the ingredients used in the experimental diets supplied.

Variable	Ingredients		
	Soybean meal	Colza meal	Corn starch
Dry Matter	896.30	898.30	884.90
Crude protein	474.50	393.90	6.60
Ether extract	65.80	28.50	0.00
Ash	63.70	67.30	0.10
Crude fibre	66.00	95.00	0.00
Acid detergent fibre	66.60	119.60	0.00
Neutral detergent fibre	98.20	183.40	0.00
Phosphorus	6.40	12.00	0.00
Calcium	3.50	6.80	0.00
Total essential AA, %:			
Arginine	3.39	2.34	0.01
Histidine	1.25	1.06	0.01
Isoleucine	2.15	1.53	0.01
Leucine	3.62	2.76	0.04
Lysine	2.93	2.19	0.01
Methionine	0.55	0.62	0.01
Phenylalanine	2.39	1.58	0.02
Threonine	1.81	1.67	0.01
Valine	2.26	2.00	0.03
Non-essential AA, %:			
Alanine	1.99	1.68	0.02
Aspartic acid	5.28	2.70	0.02
Glutamine	8.24	2.59	0.08
Glycine	1.95	1.89	0.01
Proline	2.26	2.29	0.02
Serine	2.23	1.65	0.01
Tyrosine	1.77	1.09	0.02

concentration (mg kg⁻¹ MS), IF=dietary indicator concentration in ileal digesta (mg kg⁻¹ MS). Each pig fed with the nitrogen-free diet was used to calculate the basal loss of endogenous AA Eq. [3]. $IAA_{end} = AA_{digesta} \times (M_{diet}/M_{digesta})$, where: IAA_{end} =basal endogenous loss of an amino acid (g kg⁻¹ MS ingested), $AA_{digesta}$ =concentration of that amino acid in ileal digesta (g kg⁻¹ MS), M_{diet} and $M_{digesta}$ =dietary and digesta marker concentrations (g kg⁻¹ MS). The DIE of protein and AA of the diets was calculated from the correction of the DIA of the basal endogenous amino acid loss Eq. [7] $DIE = DIA + [(EndoN/ConsN) \times 100]$, where DIE =standardized ileal digestibility in percentage of a nutrient, DIA =apparent ileal digestibility of a nutrient, $EndoN$ =endogenous excreted amount of nutrient (mg kg⁻¹ MS consumed, $ConsN$ =amount of nutrient consumed (mg kg⁻¹ MS consumed). To calculate the DIE, the loss of endogenous AA was subtracted from the DIA. The DIE of the AA of the ingredients was calculated by the difference method (Stein *et al.*, 2007).

Statistical analysis

Data were analysed in a 3×3 repeated Latin square and the MIXED procedure of SAS® (SAS Institute Inc., 2004) was used. Each pig was a randomized experimental unit and subject. The comparison of means was performed with Tukey's test ($p \leq 0.05$); and for the assignment of literals in the generalized difference matrix, the macro procedure pdmix800.sas was used, which standardizes the generated matrix of *pdiffs* values from the multiple comparison of means test from the Latin square, into another with the corresponding assignment of literals.

RESULTS AND DISCUSSION

Nutritional characteristics of ingredients

PS is the main source of protein and AA used in fattening swines and breeding pigs diets. The crude protein, lysine and threonine contents of PS (Table 3) were similar to those shown by the NRC (2012). In Mexico, PS used for feeding livestock species comes mainly from the United States (SAGARPA, 2017), and contains 47.4 % on average of crude protein and 2.93 % lysine. These values match those found by Lagos and Stein (2017) in PS from the United States. In this study, the crude protein and lysine contents observed, are similar to those reported by Lagos and Stein (2017) and SAGARPA (2017).

PC is the second most used vegetable protein source worldwide to feed livestock species; in Mexico, this by-product comes mostly from Canada (SAGARPA, 2017). The average crude protein content of PC varies from 36.5 to 42.3 %, and regarding AA PC provides (%) 1.99 lysine, 1.48 threonine and 0.69 methionine (Mejicanos *et al.*, 2016). In this research, PC had an average crude protein content of 39.39 %, which is within the range mentioned above; in contrast, lysine content was higher 2.19 % and methionine content lower 0.62 % in regard to that indicated by Mejicanos *et al.* (2016).

Woyengo *et al.* (2016) found that *B. juncea* and *B. napus* colza meals had similar crude protein content (38.1 vs. 38.4 %), but different lysine (1.99 vs. 2.14 %), ether extract (2.46 vs. 2.85 %) and FDN (18.3 vs. 26.1 %). Also, the values in this study are similar to those published in NRC (2012). Some of the classification criteria for soybean and colza plant varieties are given by their ability to adapt to the type of soil and geographical region. As well as the maturity of the plant at the time of cutting or harvest where it is grown; consequently, this can influence the nutritional content of these oilseeds (Panagiota *et al.*, 2014).

Apparent ileal digestibility

The DIA of histidine, alanine, glutamine, glycine and proline were similar ($p > 0.05$) in both ingredients. The DIA of lysine and threonine in PS was 6.29 and 3.44 % higher ($p \leq 0.05$) than the DIA of the same AA in PC. However, the DIA of methionine in PC was 3.88 % higher than in PS. Regarding arginine, isoleucine, leucine, phenylalanine, valine, aspartic acid, tyrosine and valine, the DIA in PS was higher ($p \leq 0.05$) than in PC. The DIA in total AA was similar in both ingredients ($p > 0.05$) (Table 4). Kong *et al.*

Table 4. Apparent ileal digestibility of amino acids (%) in soybean and colza meal based diets fed to finishing pigs.

Variable	Experimental diets		EEM [†]	p Value ≤
	Soybean meal	Colza meal		
Essential AA, %:				
Arginine	88.74 a	86.11 b	0.100	0.045
Histidine	84.69	84.02	1.135	0.404
Isoleucine	84.10 a	78.59 b	1.006	0.005
Leucine	83.69 a	80.90 b	0.953	0.019
Lysine	84.76 a	78.47 b	1.058	0.001
Methionine	85.90 b	89.78 a	1.016	0.001
Phenylalanine	83.80 a	81.64 b	1.009	0.016
Threonine	74.42 a	70.98 b	1.249	0.001
Valine	78.62 a	74.46 b	1.067	0.001
Non-essential AA, %:				
Alanine	75.42	76.91	1.793	0.174
Aspartic acid	80.99 a	77.70 b	1.320	0.010
Glutamine	83.52	86.06	1.733	0.176
Glycine	60.53	67.50	3.194	0.087
Proline	60.20	68.92	10.02	0.368
Serine	81.13 a	76.19 b	0.982	0.001
Tyrosine	84.56 a	81.75 b	0.864	0.001
Total	79.62	78.60	1.361	0.225

[†]Standard error of the mean. ab: Means per row with different literals are different ($p \leq 0.05$).

(2014), measured the DIA of AA in the soybean meal from Korea in finishing pig diets and determined that the DIA of lysine, threonine, methionine and tryptophan was 79.3, 69.0, 84.7 and 78.4 %, respectively.

In this study, the DIA of lysine in PS was 84.76 % (Table 4), a value 5.46 % higher than that found by Kong *et al.* (2014). On the other hand, Oliveira and Stein (2016) measured the DIA of AA in growing pigs and obtained DIA values of lysine, threonine, methionine and tryptophan of 87.3, 78.9, 88.1 and 87.3 %, respectively. In this study, the DIA of lysine in PS was 2.54 % lower than that found by Oliveira and Stein (2016). Likewise, the DIA of threonine and methionine in PS was 74.42 and 85.90 %, these values are higher than those indicated by Kong *et al.* (2014), and lower than Oliveira and Stein (2016).

Adebiyi *et al.* (2015) evaluated the DIA of AA from soybean and colza meals in growing pigs (PV 35±2. 6 kg), the diets provided the same content of ED 3442 kcal kg⁻¹ MS and crude protein 195 g kg⁻¹ MS, but different content 35 and 69 g kg⁻¹ MS crude fibre, and 135 and 172 g kg⁻¹ MS FDN, respectively; the authors published higher DIA values for essential and non-essential AA, and total AA in the soybean meal diet compared to the colza meal diet. In that study, the DIA value of total AA of the soybean meal diet was similar (77.9 *vs.* 79.62 %) to that of the PS diet in this study. In contrast, the DIA value

of total AA of the diet with colza meal reported by Adebisi *et al.* (2015) was lower (68.2 vs. 78.6 %) compared to the PC diet of this research (Table 4).

Liu *et al.* (2016b) measured the DIA of colza meal from Canada and the protein ingredient had 386 g kg⁻¹ MS crude protein and 2.1 % lysine; the DIA value in total amino acids was 76.78 %, which is 5.2 % lower than that observed for PC in this study. In swine nutrition, there are several factors that influence the digestibility of AA, such as the type and level of inclusion of the protein ingredient in the diet. As well as the fibre content that has a direct influence because it affects the rate of passage of the feed through the gastrointestinal tract (Zhang *et al.*, 2013). In this study, the lower DIA observed in AA of PC may have been due to the higher crude fibre and FDN content relative to PS (Table 3).

Woyengo *et al.* (2016) found, in finishing pig diets, that *B. juncea* colza meal by-product had higher DIA coefficients in the AA arginine, histidine, isoleucine, lysine, and valine than *B. napus* colza meal, and they argued that the reduced DIA of these nutrients was likely due to the higher FDN content of *B. napus* colza meal. In addition, Bueckert and Clarke (2013) pointed out that the higher fibre content of *B. napus* colza seed is due to its thicker coat. However, the optimal fibre level with different protein ingredients in diets for fattening swines, from which the DIA of AA is reduced, is yet to be determined.

Standardized ileal digestibility

The DIE of AA is the digestibility of AA from the ingested feed, without considering AA of endogenous origin (Casas *et al.*, 2018). The DIE of methionine in PS was 86.69 %, a value 3.61 % lower ($p \leq 0.05$) than in PC (90.30 %). The DIE values of lysine and threonine in PS were 85.18 and 75.24 %, so their DIE was 6.32 and 3.61 % higher ($p \leq 0.05$) than in PC. The DIE of histidine, alanine, glutamine, glycine and proline, in both ingredients, were similar ($p > 0.05$). The DIE of arginine, isoleucine, leucine, phenylalanine, valine, aspartic acid, serine and tyrosine in PS was higher ($p \leq 0.05$) compared to PC. The DIE in total AA was similar ($p > 0.05$) in both protein meals (Table 5).

The aforementioned is similar to what was found by Adebisi *et al.* (2015) in DIA in growing pigs and the DIE values of crude protein, essential and non-essential AA, and total AA were higher in soybean meal diet compared to colza meal diet. The DIE value of total AA of the soybean meal diet, obtained by Adebisi *et al.* (2015), is higher than that of the PS diet of this research; in contrast, the DIE value of total AA of the colza meal diet, according to Adebisi *et al.* (2015) was lower compared to the PC diet of this study.

In this research, the PS and PC evaluated were from by-products obtained after oil extraction from the seeds, which were subjected to heat and pressure processes, which could affect the integrity of the protein and, consequently, the digestibility of the AA in both ingredients (Landerio *et al.*, 2012). Quality control of soybean and colza by-products should consider that heat excess treatment reduces the presence of

Table 5. Standardized ileal digestibility of amino acids (%) in diets based on soybean and colza meals fed to finishing pigs.

Variable	Experimental diets		EEM [†]	<i>p</i> Value ≤
	Soybean meal	Colza meal		
Essential AA, %:				
Arginine	89.45 a	87.07 b	0.979	0.039
Histidine	85.11	84.37	1.151	0.361
Isoleucine	84.51 a	78.99 b	1.022	0.005
Leucine	84.08 a	81.25 b	0.970	0.019
Lysine	85.18 a	78.86 b	1.040	0.001
Methionine	86.69 b	90.30 a	1.039	0.001
Phenylalanine	84.22 a	82.02 b	1.027	0.015
Threonine	75.24 a	71.63 b	1.280	0.001
Valine	79.35 a	75.06 b	1.093	0.001
Non-essential AA, %:				
Alanine	76.50	77.81	1.839	0.221
Aspartic acid	81.46 a	78.25 b	1.345	0.011
Glutamine	83.87	86.37	1.746	0.182
Glycine	63.40	69.63	2.963	0.106
Proline	71.41	73.52	8.430	0.515
Serine	81.82 a	76.83 b	0.995	0.001
Tyrosine	85.00 a	82.21 b	0.887	0.001
Total	80.82	79.66	1.302	0.171

[†]Standard error of the mean. ^{ab}Means per row with different literals are different (*p* ≤ 0.05).

trypsin inhibitors (IT), but can also increase Maillard-type reactions, and consequently negatively affect protein and amino acid digestibility. In particular, lysine and cystine, whose use at the level of intermediary metabolism would not be possible for protein synthesis. In contrast, soybean and colza seeds with insufficient heating may have much of the IT present without inactivation (Almeida *et al.*, 2014).

The difference in AA digestibility may also be due to factors associated with plant origin and variety (Panagiota *et al.*, 2014). According to Woyengo *et al.* (2016), *B. juncea* colza meal had higher DIE coefficients of total AA, lysine and EN value compared to *B. napus* colza meal. Consequently, the former contributed more digestible AA to the diet and net energy to meet the requirements of finishing pigs.

Diets with high crude fibre content result in greater loss of endogenous AA, due to increased fibre contact with the gastrointestinal tract wall, resulting in greater cellular desquamation that is not accounted for in the DIE (Zhengqun *et al.*, 2016). According to Jha and Berrocoso (2016) soluble dietary fibre can affect the digestibility of protein and AA due to an increase in digesta viscosity; consequently, the contact between enzymes, digestive contents and absorptive surface in the small intestine is reduced. Likewise, Liu *et al.* (2016b) indicated that the lignin (LDA) and cellulose content of the diet can affect the digestibility of nutrients by increasing the volume and rate of digesta passage along the gastrointestinal tract of the pig.

In this research, hemicellulose (FDN) content was different among diets (Table 3), but this factor did not affect the DIA or DIE of total AA, as it occurred in the study by Adebiyi *et al.* (2015), in which FDN values were similar to those in this research. Zhang *et al.* (2013) indicated that a high level of fibre in the diet of pigs can reduce appetite and feed intake, and also increase endogenous nitrogen and AA flux to the intestine; in addition to reducing energy use efficiency and digestibility of feed protein and AA.

CONCLUSIONS

The content and values of apparent ileal and standardized ileal digestibility of essential amino acids present in soybean meal were higher compared to colza meal, except for methionine. The apparent ileal digestibility of total essential and nonessential amino acids was similar in both protein ingredients except lysine and threonine, with higher values in soybean meal. Because of this availability, the capacity of the preparations differed in meeting the requirements of finishing pigs.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the Faculty of Veterinary Medicine and Animal Husbandry and the Research and Advanced Studies Secretariat of the the Autonomous University of the State of Mexico, for the support granted through research project number 3447/2013 CHT. To the Institute of Agricultural Sciences of the Autonomous University of Baja California and the University of Missouri at Columbia, MO, USA, for their support in the laboratory analyses to measure amino acids.

REFERENCES

- Adebiyi AO, Ragland D, Adeola O, Olukosi O. 2015. Apparent or standardized ileal digestibility of amino acids of diets containing different protein feedstuffs fed at two crude protein levels for growing pigs. *Asian-Australasian Journal of Animal Science* 28: 1327–1334. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0914>
- Almeida FN, Htoo JK, Thomson J, Stein HH. 2014. Effects of heat treatments on the apparent and standardized ileal digestibility of amino acids in colza meal fed to growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 187: 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.09.009>
- AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). 2012. *Official Methods of Analysis*, 19th ed. Association Official Analytical Chemists. AOAC International. Arlington, VA, USA.
- Berrocoso JD, Rojas OJ, Liu Y, Shoulders J, Gonzalez-Vega JC, Stein HH. 2015. Energy concentration and amino acid digestibility in high protein colza meal, conventional colza meal, and in soybean meal fed to growing pigs. *Journal of Animal Science* 93: 2208–2217. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8528>
- Bueckert RA, Clarke JM. 2013. Review: annual crop adaptation to abiotic stress on the Canadian prairies: six case studies. *Canadian Journal Plant Science* 93: 375–385. <https://doi.org/10.4141/cjps2012-184>
- Casas GA, Jaworski NW, Too JK, Stein HH. 2018. Ileal digestibility of amino acids in selected feed ingredients fed to young growing pigs. *Journal of Animal Science*. 96: 2361–2370. <https://dx.doi.org/10.1093%2Fjas%2Fsky114>
- Cervantes RM, Vizcarra VV, Rodriguez RS, Gonzalez MJS, Flores AL. 1999. Canulación duodenal e ileal para estudios de digestión en cerdos. *Agrociencia* 34: 135–139. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30234203> (Retrieved: July 2021).
- Fenton TW, Fenton M. 1979. An improved procedure for the determination of chromic oxide in feed and faeces. *Canadian Journal of Animal Science* 59: 631–634. <https://doi.org/10.4141/cjas79-081>
- Jha R, Berrocoso J. 2016. Dietary fibre and protein fermentation in the intestine of swine and their interactive effects on gut health and on the environment: A review. *Animal Feed Science and Technology* 212: 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.12.002>

- Kong C, Kang HG, Kim BG, Kim KH. 2014. Ileal digestibility of amino acids in meat meal and soybean meal fed to growing pigs. *Asian Australasian Journal of Animal Science* 27: 990–995. <https://dx.doi.org/10.5713/2Fajas.2014.14217>
- Lagos LV, Stein HH. 2017. Chemical composition and amino acids digestibility of soybean meal produced in the United States, China, Argentina, Brazil, or India. *Journal of Animal Science* 95: 1626–1636. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1440>
- Landero JL, Beltranena E, Cervantes M, Araiza AB, Zijlstra RT. 2012. The effect of feeding expeller-pressed colza meal on growth performance and diet nutrient digestibility in weaned pigs. *Animal Feed Science and Technology* 17: 240–245. <https://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.11.004>
- Liu Y, Jaworski NW, Rojas OJ, Stein HH. 2016a. Energy concentration and amino acids digestibility in high protein colza meal, conventional colza meal, and in soybean meal fed to growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 212: 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.11.017>
- Liu Z, Zhang SLvS, Lui J, Zhang H. 2016b. Effects of dietary cellulose levels on the estimation of endogenous amino acids losses and amino acids digestibility for grower pigs. *Animal Nutrition* 2: 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.04.001>
- Mejicanos G, Sanjayan I, Kim H, Nyachoti CN. 2016. Recent advances in colza meal utilization in swine nutrition. *Journal Animal Science and Technology* 58: 7–19. <https://dx.doi.org/10.1186%2Fs40781-016-0085-5>
- Moughan JP, Miner WW. 2013. Determination of protein digestibility in the growing pigs. In *Nutritional and physiological functions of amino acids in pigs*, Blachier F, Wu G, Yin Y (Ed.); Springer: Vienna, Austria, 251–271. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-1328-8_17
- Nawas SR, Yao JJ, Hussain RAI, Abdalla EMM, Ahmed SS, Musa BB, Yang X. 2017. Endogenous amino acids losses (EAAL) in growing pigs influence on methodology and factors are affecting – a Review. *Scholars Journal Agriculture and Veterinary Science* 4: 35–46. <https://saspublishers.com/sjavs/> (Retrieved: July 2021).
- NRC (National Research Council). 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 11th ed. National Academy Press, Washington, DC, USA. 420 p. <https://www.worldcat.org/title/nutrient-requirements-of-swine/oclc/794624630> (Retrieved: July 2021)
- OIRSA (Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria). 2017. Guía rápida para la elaboración de muestreos estadísticos en los programas de vigilancia epidemiológica: microbiológicos y residuos tóxicos. Dirección Regional de Inocuidad de Alimentos. El Salvador, San Salvador, C. A. <https://www.oirsa.org/contenido/biblioteca/Gu%C3%ADa%20r%C3%A1pida%20de%20muestreo%20estad%C3%ADstico%20en%20Inocuidad%20Alimentaria%20-%20OIRSA.pdf> (Retrieved: May 2021).
- Ruiz N, Parsons CM, Stein HH, Coon CN, van Eys JE, Miles RD. 2020. A review: 100 years of soybean meal. *Feedstuffs* <https://www.feedstuffs.com/print/40435> (Retrieved: May 2021).
- Oliveira MS, Stein HH. 2016. Digestibility of energy, amino acids, and phosphorus in a novel source of soy protein concentrate and in soybean meal fed to growing pigs. *Journal of Animal Science* 94: 3343–3352. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0505>
- Panagiota FP, Efterpi C, Ilias G, Eleftherios B, Ioannis S, Anastasios T, Athina T, Jian P. 2014. Alternative protein sources to soybean meal in pigs diets. *Journal of Food Agriculture and Environment* 12: 655–660. <http://www.world-food.net/> (Retrieved: July 2021).
- SAGARPA - DOF. 2001 (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación en el Diario Oficial de la Federación). Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999. Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio. Diario Oficial de la Federación 2001. Dirección General Jurídica, SAGARPA, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/203498/NOM-062-ZOO-1999_220801.pdf (Retrieved: July 2021).
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Naturales, Pesca y Alimentación). 2017. Oleaginosas, colza, cártamo, girasol, soya mexicana. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Ciudad de México, México. 46 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256431/B_sico-Oleaginosas-parte_una.pdf (Retrieved: July 2021).
- SAS Institute Inc. 2004. *SAS/STAT® 9.1 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc. 1028 p.
- Stein HH, Sève B, Fuller MF, Moughan PJ, de Lange CF. 2007. Invited review: amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: terminology and application. *Journal of Animal Science* 81: 172–180. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-742>

- Van Soest PJ, Roberson JB, Lewis BA. 1991. Methods for dietary fibre, neutral detergent and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74: 3583-3897. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(91)78551-2)
- Woyengo TA, Beltranena E, Zijlstra RT. 2014. Controlling feed cost by including alternative ingredients into pig diets: a review. *Journal of Animal Science* 92: 1293-1305. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7169>
- Woyengo TA, Sánchez JE, Yañez J, Beltranena E, Cervantes M, Morales A, Zijlstra RT. 2016. Nutrient digestibility of colza co-products for grower pigs. *Animal Feed Science and Technology* 222: 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.09.009>
- Zhang W, Li D, Liu L, Zhang J, Duan Q, Yang W, Zhang L. 2013. The effects of dietary fibre level on nutrient digestibility in growing pigs. *Journal Animal Science and Biotechnology* 4: 17-24. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-17>
- Zhengqun L, Shuaibing LV, Shiuyan Z, Jingbo L, Hongfu Z. 2016. Effects of dietary cellulose levels on the estimation of endogenous amino acids losses and amino acid digestibility for growing pigs. *Animal Nutrition* 2: 74-78. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.04.001>

DIGESTIBILIDAD ILEAL APARENTE Y ESTANDARIZADA DE AMINOÁCIDOS EN DIETAS CON PASTAS DE SOYA Y CANOLA PARA CERDOS EN FINALIZACIÓN

Juan Edrei **Sánchez-Torres**¹, Ignacio Arturo **Domínguez-Vara**^{1*}, Luis **Castro-Bárcena**¹,
Jorge Luis **Yañez-Hernández**², Miguel **Cervantes-Ramírez**³, Ernesto **Morales-Almaraz**¹,
José Luis **Bórquez-Gastelum**¹, Daniel **Trujillo-Gutierrez**¹

¹ Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, Estado de México, México. C. P. 50090.

² Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de Tlaxcala. La Loma Xicoténcatl, Tlaxcala de Xicoténcatl, México. C. P. 90000.

³ Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México. C. P. 21705.

* Corresponding author: igy92@hotmail.com

RESUMEN

Las cadenas agroalimentarias generan subproductos, como pastas de soya y canola para alimentación animal. Su valor nutrimental es variable y debe analizarse para un mejor control de calidad, antes de su inclusión de dietas balanceadas. El objetivo fue determinar el contenido y digestibilidad ileal aparente y estandarizada de proteína y aminoácidos (AA) de pastas de soya (PS) y canola (PC), como fuente de proteína en dietas para cerdos en finalización. El diseño experimental fue en cuadro latino repetido 3x3 y los tratamientos fueron T1: PS+almidón de maíz, T2: PC+almidón de maíz, y T3: almidón de maíz, los cuales se asignaron aleatoriamente a seis cerdos con cánula en el íleon distal (PV 75±1.2 kg). Las variables fueron contenidos y digestibilidad ileal aparente e ileal estandarizada de aminoácidos en pasta de soya y canola. Para determinar la digestibilidad se adicionó óxido crómico a las dietas. El contenido de proteína y grasa fue mayor en la pasta de soya. El contenido de cenizas, fibra cruda, fibra detergente neutra, fibra detergente ácida, fósforo y calcio fue mayor en la pasta de canola. El contenido de aminoácidos esenciales fue mayor en la pasta de soya, pero metionina fue mayor en la pasta de canola. La digestibilidad ileal aparente (DIA) de los aminoácidos totales fue similar ($p > 0.05$) entre ingredientes; pero para lisina y treonina fue mayor ($p \leq 0.05$) en la pasta de soya, excepto metionina. La DIA de metionina fue 89.78 %, 3.88 % mayor ($p \leq 0.05$) en pasta de canola. La digestibilidad ileal estandarizada (DIE) de aminoácidos totales fue similar ($p > 0.05$) entre ingredientes, pero lisina y treonina fueron mayores ($p \leq 0.05$) en pasta de soya. La DIE fue diferente ($p \leq 0.05$) entre ingredientes para todo aminoácido, excepto metionina. Las digestibilidades ileal y estandarizada de todos los aminoácidos fueron mayores en pasta de soya, excepto metionina, la cual fue mayor en pasta de canola. La DIA del total de aminoácidos fue similar en ambos ingredientes, excepto lisina y treonina en pasta de soya, y metionina en pasta de canola.

Palabras clave: aminoácidos, cerdos, digestibilidad, pastas, soya, canola.

Citation: Sánchez-Torres JE, Domínguez-Vara IA, Castro-Bárcena L, Yañez-Hernández JL, Cervantes-Ramírez M, Morales-Almaraz E, Bórquez-Gastelum JL, Trujillo-Gutierrez D. 2022. Ileal apparent and standardized amino acid digestibility of soybean and colza meal in diets for finishing pigs. *Agrociencia* <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2740>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: April 09, 2021.
Approved: March 09, 2022.
Estimated publication date:
March 25, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 181-206.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCCIÓN

Las industrias para alimentación y biocombustibles aumentaron la demanda de granos de cereales y semillas de oleaginosas; lo cual aumentó su costo y limita su inclusión en dietas para especies pecuarias. Estas industrias generan subproductos cuya composición química y digestibilidad requieren caracterizarse para utilizarse en el balanceo y optimización de dietas para ganado porcino (Woyengo *et al.*, 2014).

La nutrición y alimentación porcina se basan en dietas balanceadas que cubran los requerimientos de energía y aminoácidos (AA) según la etapa fisiológica del cerdo; pero, sin exceder su contenido para minimizar la excreción de nitrógeno (N) al ambiente (National Research Council - NRC, 2012). Por lo tanto, evaluar la biodisponibilidad de cada aminoácido esencial es un aspecto crítico para valorar la calidad nutrimental de los ingredientes, así como para estimar los requerimientos de AA en cerdos. Estos estudios facilitan generación, desarrollo e intercambio de información a nivel mundial (Moughan *et al.*, 2013); tres áreas predominan en los programas de alimentación sobre fuentes vegetales proteicas: la digestibilidad de aminoácidos, los factores anti nutricionales y los contenidos de energía metabolizable y energía neta (Ruiz *et al.*, 2020).

En México, la producción de semillas de soya [*Glycine max* (L.) Merrill] y canola (*Brassica napus*) para extracción de aceite en 2016 fue de 510 000 Mg (Megagramos) de soya y 4070 Mg de canola, pero el déficit nacional de semilla aún es significativo (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - SAGARPA, 2017). Por lo tanto, en este año, hubo mayor cantidad de subproductos proteicos disponibles y se requiere caracterizar sus nutrientes. La pasta de soya (PS) y pasta de canola (PC) son los residuos de extracción de aceite; el proceso se realiza por medio de solventes o por presión mecánica de semillas de soya y canola. Ambos subproductos se utilizan en la alimentación animal y se caracterizan por su alto contenido de proteína cruda y AA, pero en la canola hay valores mayores de fibra que pueden afectar la disponibilidad de la proteína y los AA (NRC, 2012; Woyengo *et al.*, 2016).

La PS y PC que se usan en la alimentación de cerdos en México, provienen principalmente de Estados Unidos y Canadá, pero se desconoce en general el contenido y digestibilidad de los AA. Lagos y Stein (2017) demostraron que la digestibilidad ileal aparente (DIA) de la proteína y AA de la PS que se produce en otros países fue diferente. Los valores de digestibilidad ileal estandarizada (DIE) de aminoácidos de la PS son superiores a la mayoría de otras fuentes proteicas vegetales (Berrocoso *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016a). También, la DIE de AA de la PS de EEUU es mayor que en la PS de otros países (Lagos y Stein, 2017).

Woyengo *et al.* (2016) determinaron los coeficientes de digestibilidad ileal estandarizada (DIE) de AA de cuatro subproductos de canola en dietas para cerdos en finalización, donde la PC *B. juncea* mostró mayor DIE de AA que la obtenida de *B. napus*, por lo tanto, aportó más AA digestibles para cubrir los requerimientos de AA de los cerdos. En México, los nutriólogos de cerdos usan la información sobre requerimientos nutricionales generada en el país y en otros. En especial, con base en la edición

NRC (2012), la cual presenta valores promedio y desviación estándar, producto de varias investigaciones. La información generada en este estudio contribuirá para la construcción de bases de datos nacionales, en el corto y mediano plazo, tanto de los requerimientos nutricionales (proteína y AA) de cerdos en finalización de genotipo Duroc x Landrace, como de tablas de composición química de los alimentos proteicos pastas de soya y canola (aporte de AA y digestibilidad). Esta información tabulada podrá ser utilizada para el balanceo de dietas bajo el concepto de proteína ideal, con menor excreción proteica en heces y orina hacia el ambiente y mayor eficiencia de uso del nitrógeno de las dietas suministradas. La hipótesis fue que la PS y PC tienen digestibilidades ileal aparente y estandarizada de proteína y AA similares. El objetivo del estudio fue determinar el contenido y la digestibilidad ileal aparente y estandarizada de la proteína y los aminoácidos de dos subproductos proteicos, pastas de soya y canola, en dietas para cerdos en finalización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Comité de Bioética y Bienestar Animal de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México revisó y aprobó los procedimientos quirúrgicos, experimentales y de cuidado de los cerdos de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999 de la SAGARPA en el Diario Oficial de la Federación (SAGARPA/DOF, 2001).

Cerdos experimentales y dietas

Una cánula tipo T se insertó en íleon distal por medio de cirugía (Cervantes *et al.*, 1999), en seis cerdos castrados (PV promedio 75 ± 1.2 kg; F1 Duroc x Landrace). Los cerdos fueron desparasitados, por inyección subcutánea, de 300 μ g de ivermectina por kg de peso (1 mL por 33 kg de peso) (Ivomec Boehringer®) y se alojaron en unidades metabólicas individuales (1.2 x 1.2 m) que permitieron moverse libremente, consumir el alimento ofrecido sin rechazo y permanecer clínicamente sanos durante todo el período experimental. Las jaulas tenían piso de plástico, paredes de cloruro de polivinilo (altura 0.9 m), con un comedero automático tipo tolva y bebedero automático.

Las muestras de PS y PC se recolectaron en la planta de alimentos de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UAEM, para analizar su composición nutrimental, a partir de lotes totales de 5 Mg, muestras primarias fueron extraídas de sacos con capacidad de 50 kg ($n = 15$), luego se conformó una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg de cada ingrediente, con técnicas de muestreo descritas en la guía para elaboración de muestreos estadísticos en programas de vigilancia epidemiológica: microbiológicos y residuos tóxicos (Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria - OIRSA, 2017).

Las dietas que se evaluaron contenían sobre base seca (% BS) pasta de soya (PS), pasta de canola (PC) y sin fuente de nitrógeno (Cuadro 1). La calidad nutrimental de PS y PC se evaluó de forma individual (Cuadro 2) y con las dietas (Cuadro 3). La dieta sin

Cuadro 1. Composición (g kg⁻¹ BS) de las dietas experimentales.

Ingredientes	Dietas experimentales		
	Pasta de soya	Pasta de canola	Libre de nitrógeno
Almidón de maíz	511.00	523.90	852.00
Pasta de soya	416.00	----	----
Pasta de canola	----	406.00	----
Azúcar	30.00	30.80	50.00
Solka floc	----	----	30.00
Aceite de canola	12.00	12.30	20.00
Piedra caliza	3.00	----	10.00
Fosfato monodiválcico	11.00	10.00	12.00
Sal	2.00	2.00	5.00
Premezcla de vitaminas [†]	5.00	5.00	5.00
Premezcla de minerales [‡]	5.00	5.00	5.00
KCO ₃ , 56 % K	----	----	5.00
MgO, 58 % Mg	----	----	1.00
Oxido de cromo	5.00	5.00	5.00

[†]Premezcla de vitaminas (UI g⁻¹)=vitamina A, 4,500; vitamina D₃, 800; vitamina E, 30; vitamina K₃, menadiona, 1.6 mg kg⁻¹; biotina, 100 mg kg⁻¹; cianocobalamina, 16 µg kg⁻¹; colina, 300 mg kg⁻¹; ácido fólico, 900 mg kg⁻¹; niacina, 16 mg kg⁻¹; ácido pantoténico 10 mg kg⁻¹; piridoxina 2.5 mg kg⁻¹; riboflavina 8 mg kg⁻¹; tiamina, 1.3 mg kg⁻¹.

[‡]Premezcla mineral (mg kg⁻¹)=Co, 0.65; Cu, 12; Fe, 100; I, 0.50; Mn, 35; Se, 0.25; Zn, 100.

nitrógeno se usó para estimar la pérdida basal de aminoácidos endógenos (Nawas *et al.*, 2017). Para medir la digestibilidad, las dietas incluyeron 3 g kg⁻¹ de óxido de cromo (Cr₂O₃), como marcador externo indigerible.

De las dietas se calculó su contenido nutrimental (Cuadro 2). La PS y PC fueron las únicas fuentes de nitrógeno (proteína y aminoácidos). Las dietas se formularon para cubrir los requerimientos de vitaminas y minerales de cerdos en finalización (NRC, 2012).

Procedimiento experimental

El experimento tuvo tres periodos de 7 d cada uno; los primeros 5 d fueron para adaptar los cerdos a la dieta, seguido de 2 d para recolectar contenidos ileales. El consumo de alimento fue limitado a tres veces el requerimiento de energía digestible de mantenimiento (3×110 kcal de ED kg⁻¹ PV^{0.75}; NRC, 2012), basado en el peso vivo metabólico del cerdo al inicio de cada periodo. El alimento se suministró en dos porciones iguales, a las 0800 y 1500 h. El contenido ileal de cada cerdo y periodo, se recolectó de manera continua de 0800 a 1800 h homogenizado y conservado en congelación a -20 °C.

Recolección, proceso y análisis de muestras

El contenido ileal total, recolectado por cerdo y periodo, se descongeló y se realizó una muestra compuesta; de esta se tomaron 100 g que se secaron en liofilizador Labconco

Cuadro 2. Contenido de nutrientes (g kg^{-1} MS) y perfil de aminoácidos (%) analizados en las dietas experimentales suministradas.

Variable	Dietas experimentales		
	Pasta de soya	Pasta de canola	Libre de nitrógeno
Materia seca	892.70	896.20	886.20
Proteína cruda	191.00	167.70	6.60
Extracto etéreo	29.50	29.70	23.60
Cenizas	33.70	42.40	39.70
Fibra cruda	27.40	28.00	23.00
Fósforo	4.70	6.20	4.70
Calcio	5.20	5.20	5.20
AA esenciales, %:			
Arginina	1.05	1.14	0.01
Histidina	0.41	0.43	0.01
Isoleucina	0.70	0.75	0.01
Leucina	1.19	1.33	0.04
Lisina	0.95	1.05	0.01
Metionina	0.18	0.27	0.01
Fenilalanina	0.78	0.79	0.02
Treonina	0.59	0.75	0.01
Valina	0.75	0.92	0.03
AA no esenciales, %:			
Alanina	0.66	0.79	0.02
Acido aspártico	1.70	1.47	0.02
Glutamina	2.71	3.12	0.08
Glicina	0.63	0.85	0.01
Prolina	0.72	1.03	0.02
Serina	0.73	0.78	0.01
Tirosina	0.52	0.52	0.02

FreeZone™ Freeze-Dry Systems 4.5 L 117-A65312906 (República Checa). Las dietas, ingredientes (PS y PC) y contenidos ileales liofilizados, se molieron a un tamaño de partícula de 1 mm con un molino (General Electric, 5KH39QN5525, México). En dietas e ingredientes (Cuadros 2 y 3) se analizó: materia seca (método 930.15), proteína cruda (método 984.13 A-D), extracto etéreo (método 920.39A), fibra cruda (método 985.29) y cenizas (método 942.05) según AOAC (2012). La fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) se determinaron según Van Soest *et al.* (1991) en un digestor ANKOM200 (ANKOM Technology Corporation, Fairport, NY, USA); para eliminar el almidón presente se agregó alfa amilasa.

El perfil de aminoácidos en ingredientes, dietas y contenido ileal se analizó en los laboratorios de la estación experimental de la Universidad de Missouri, E.U.A. (método 982.30; AOAC, 2012). Para medir la digestibilidad en las dietas y el contenido ileal se analizó el contenido de óxido crómico (Cr_2O_3) por espectrofotometría a 440 nm, después de incinerar la muestra durante 12 h a 450 °C (Fenton y Fenton, 1979).

Cuadro 3. Contenido de nutrientes (g kg⁻¹ MS) y perfil de aminoácidos (%) en los ingredientes usados en las dietas experimentales suministradas.

Variable	Ingredients		
	Pasta de soya	Pasta de canola	Almidón de maíz
Materia seca	896.30	898.30	884.90
Proteína cruda	474.50	393.90	6.60
Extracto etéreo	65.80	28.50	0.00
Cenizas	63.70	67.30	0.10
Fibra cruda	66.00	95.00	0.00
Fibra detergente ácido	66.60	119.60	0.00
Fibra detergente neutro	98.20	183.40	0.00
Fósforo	6.40	12.00	0.00
Calcio	3.50	6.80	0.00
AA esenciales, %:			
Arginina	3.39	2.34	0.01
Histidina	1.25	1.06	0.01
Isoleucina	2.15	1.53	0.01
Leucina	3.62	2.76	0.04
Lisina	2.93	2.19	0.01
Metionina	0.55	0.62	0.01
Fenilalanina	2.39	1.58	0.02
Treonina	1.81	1.67	0.01
Valina	2.26	2.00	0.03
AA no esenciales, %:			
Alanina	1.99	1.68	0.02
Acido aspártico	5.28	2.70	0.02
Glutamina	8.24	2.59	0.08
Glicina	1.95	1.89	0.01
Prolina	2.26	2.29	0.02
Serina	2.23	1.65	0.01
Tirosina	1.77	1.09	0.02

Cálculos

La DIA de la proteína y AA de las dietas se calculó con el método de indicador Eq. [2] $DIA = [1 - (ID \times AF) / (AD \times IF)] \times 100$. Donde DIA es la digestibilidad aparente ileal en porcentaje de un nutrimento en la dieta, ID=concentración del indicador en la dieta (mg kg⁻¹ MS), AF=concentración del nutrimento en la digesta ileal (mg kg⁻¹ MS), AD=concentración del nutrimento en la dieta (mg kg⁻¹ MS), IF=concentración del indicador en la digesta ileal (mg kg⁻¹ MS). Cada cerdo alimentado con la dieta libre de nitrógeno se utilizó para calcular la pérdida basal de AA endógenos Eq. [3]. $IAA_{end} = AA_{digesta} \times (M_{diet} / M_{digesta})$; donde IAA_{end}=pérdida endógena basal de un aminoácido (g kg⁻¹ MS ingerida), AA_{digesta}=concentración de ese aminoácido en la digesta ileal (g kg⁻¹ MS), M_{diet} y M_{digesta}=concentraciones de marcadores en la dieta y la digesta (g kg⁻¹ MS). La DIE de la proteína y los AA de las dietas se calculó de la corrección de la DIA de la pérdida de aminoácidos endógenos basales Eq. [7]

$DIE = DIA + [(EndoN/ConsN) \times 100]$; donde DIE=digestibilidad ileal estandarizada en porcentaje de un nutrimento, DIA=digestibilidad ileal aparente de un nutrimento, EndoN=cantidad endógena excretada del nutrimento ($mg\ kg^{-1}$ MS consumida, ConsN=cantidad de nutrimento consumido ($mg\ kg^{-1}$ MS consumida). Para calcular la DIE se restó la pérdida de AA endógenos a la DIA. La DIE de los AA de los ingredientes se calculó por el método de diferencia (Stein *et al.*, 2007).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron en cuadro latino repetido 3×3 y se usó el procedimiento MIXED de SAS® (SAS Institute Inc., 2004). Cada cerdo fue una unidad experimental y sujeto aleatorio. La comparación de medias se realizó con el método de Tukey ($p \leq 0.05$); y para la asignación de literales en la matriz generalizada de diferencias, se utilizó el procedimiento macro pdmix800.sas, el cual estandariza la matriz generada de valores *pdiffs* de la prueba múltiple de comparación de medias del cuadro latino, en otra con la asignación de literales correspondientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características nutricionales de los ingredientes

La PS es la principal fuente de proteína y AA usada en dietas de cerdos en engorda y reproductores. Los contenidos de proteína cruda, lisina y treonina de la PS (Cuadro 3) fueron similares a los que muestra el NRC (2012). En México, la PS destinada a alimentación de especies pecuarias proviene, mayormente, de Estados Unidos (SAGARPA, 2017), y contiene, en promedio, 47.4 % de proteína cruda y 2.93 % de lisina. Esos valores coinciden con los encontrados por Lagos y Stein (2017) en PS de Estados Unidos. En este estudio, los contenidos de proteína cruda y lisina observados, son similares a los reportados por Lagos y Stein (2017) y SAGARPA (2017).

La PC es la segunda fuente proteica vegetal más usada a nivel mundial para alimentar especies pecuarias; en México, este subproducto proviene, mayormente, de Canadá (SAGARPA, 2017). El contenido promedio de proteína cruda de la PC varía de 36.5 a 42.3 %, y de AA aporta (%) 1.99 lisina, 1.48 treonina y 0.69 metionina (Mejicanos *et al.*, 2016). En esta investigación, la PC tuvo un contenido medio de proteína cruda de 39.39 %, el cual está dentro del intervalo mencionado antes; en contraste, el contenido de lisina fue mayor 2.19 % y el de metionina menor 0.62 % respecto a lo indicado por (Mejicanos *et al.*, 2016).

Woyengo *et al.* (2016) encontraron que las pastas de canola *B. juncea* y *B. napus* tuvieron un contenido similar de proteína cruda (38.1 vs. 38.4 %), pero distinto de lisina (1.99 vs. 2.14 %), extracto etéreo (2.46 vs. 2.85 %) y FDN (18.3 vs. 26.1 %). Asimismo, los valores de este estudio son similares a los publicados en el NRC (2012). Algunos de los criterios de clasificación para las variedades de plantas de soya y canola son por su capacidad para adaptarse al tipo de suelo y región geográfica. Así como la madurez de la planta al momento del corte o cosecha donde se cultiva; en consecuencia, esto puede influir en el contenido nutrimental de estas oleaginosas (Panagiota *et al.*, 2014).

Digestibilidad ileal aparente

La DIA de histidina, alanina, glutamina, glicina y prolina fue similar ($p > 0.05$) en ambos ingredientes. La DIA de lisina y treonina en PS fue 6.29 y 3.44 % mayor ($p \leq 0.05$) que la DIA de los mismos AA en PC. Sin embargo, la DIA de metionina en PC fue 3.88 % mayor que en PS. Respecto a arginina, isoleucina, leucina, fenilalanina, valina, ácido aspártico, tirosina y valina, la DIA en PS fue mayor ($p \leq 0.05$) que en PC. La DIA en el total de AA fue similar en ambos ingredientes ($p > 0.05$) (Cuadro 4). Kong *et al.* (2014), midieron la DIA de AA en pasta de soya de Korea en dietas de cerdos en finalización y determinaron que la DIA de lisina, treonina, metionina y triptófano fue de 79.3, 69.0, 84.7 y 78.4 %, respectivamente.

En este estudio la DIA de lisina en PS fue de 84.76 % (Cuadro 4), valor mayor en 5.46 % a lo encontrado por Kong *et al.* (2014). Por otro lado, Oliveira y Stein (2016) midieron la DIA de AA en cerdos en etapa de crecimiento y obtuvieron valores de DIA de lisina, treonina, metionina y triptófano de 87.3, 78.9, 88.1 y 87.3 %, respectivamente. En este estudio la DIA de lisina en PS fue menor en 2.54 % a lo encontrado por Oliveira y Stein (2016). Asimismo, la DIA de treonina y metionina en PS fue de 74.42 y 85.90 %, estos valores son mayores a los indicados por Kong *et al.* (2014), y menores a los de Oliveira y Stein (2016).

Cuadro 4. Digestibilidad ileal aparente de aminoácidos (%) en dietas con base de pastas de soya y canola suministradas a cerdos en finalización.

Variable	Dietas experimentales		EEM [†]	Valor <i>p</i> ≤
	Pasta de soya	Pasta de canola		
AA esenciales, %:				
Arginina	88.74 a	86.11 b	0.100	0.045
Histidina	84.69	84.02	1.135	0.404
Isoleucina	84.10 a	78.59 b	1.006	0.005
Leucina	83.69 a	80.90 b	0.953	0.019
Lisina	84.76 a	78.47 b	1.058	0.001
Metionina	85.90 b	89.78 a	1.016	0.001
Fenilalanina	83.80 a	81.64 b	1.009	0.016
Treonina	74.42 a	70.98 b	1.249	0.001
Valina	78.62 a	74.46 b	1.067	0.001
AA no esenciales, %:				
Alanina	75.42	76.91	1.793	0.174
Ácida Aspártico	80.99 a	77.70 b	1.320	0.010
Glutamina	83.52	86.06	1.733	0.176
Glicina	60.53	67.50	3.194	0.087
Prolina	60.20	68.92	10.02	0.368
Serina	81.13 a	76.19 b	0.982	0.001
Tirosina	84.56 a	81.75 b	0.864	0.001
Total	79.62	78.60	1.361	0.225

[†]Error estándar de la media. ^{ab}Medias por fila con literal distinta son diferentes ($p \leq 0.05$).

Adebiyi *et al.* (2015) evaluaron la DIA de AA de pastas de soya y canola en cerdos en crecimiento (PV 35 ± 2.6 kg), las dietas aportaron el mismo contenido de ED 3442 kcal kg^{-1} MS y proteína cruda 195 g kg^{-1} MS, pero diferente contenido 35 y 69 g kg^{-1} MS de fibra cruda, y 135 y 172 g kg^{-1} MS de FDN, respectivamente; los autores publicaron valores mayores de DIA en AA esenciales y no esenciales, y de AA totales en la dieta con pasta de soya, comparados con la dieta con pasta de canola. En dicho estudio, el valor de DIA de AA totales de la dieta con pasta de soya fue similar (77.9 *vs.* 79.62 %) al de la dieta con PS de este estudio. En contraste, el valor de DIA de AA totales de la dieta con pasta de canola para Adebiyi *et al.* (2015) fue menor (68.2 *vs.* 78.6 %) comparado con la dieta de PC de esta investigación (Cuadro 4).

Liu *et al.* (2016b) midieron la DIA de pasta de canola proveniente de Canadá y el ingrediente proteico tuvo 386 g kg^{-1} MS de proteína cruda y 2.1 % en lisina; el valor de DIA en aminoácidos totales fue 76.78 %, el cual es 5.2 % menor al observado en PC de este estudio. En nutrición de cerdos hay varios factores que influyen en la digestibilidad de AA, como el tipo y nivel de inclusión del ingrediente proteico en la dieta, así como el contenido de fibra que tiene una influencia directa porque afecta la velocidad de paso de la ingesta en el tubo gastrointestinal (Zhang *et al.*, 2013). En este estudio, la menor DIA observada en AA de la PC pudo deberse al contenido mayor de fibra cruda y FDN respecto a la PS (Cuadro 3).

Woyengo *et al.* (2016) encontraron, en dietas de cerdos en finalización, que el subproducto de pasta de canola *B. juncea* tuvo mayor coeficiente de DIA en los AA arginina, histidina, isoleucina, lisina y valina, que el subproducto de pasta de canola *B. napus*, y ellos argumentaron que la reducción de la DIA de estos nutrientes probablemente se debió al mayor contenido de FDN de la pasta de canola *B. napus*. Además, Bueckert y Clarke (2013) señalaron que el contenido mayor de fibra de la semilla de canola *B. napus* se debe a que tiene una capa más gruesa. Sin embargo, aún no se determina el nivel de fibra óptimo con diferentes ingredientes proteicos en dietas para cerdos en engorda, a partir del cual se reduce la DIA de los AA.

Digestibilidad ileal estandarizada

La DIE de AA es la digestibilidad de los AA procedentes del alimento ingerido, sin considerar los AA de origen endógeno (Casas *et al.*, 2018). La DIE de metionina en PS fue 86.69 %, valor 3.61 % menor ($p \leq 0.05$) que en PC (90.30 %). Los valores de DIE de lisina y treonina en PS fueron 85.18 y 75.24 %, por lo cual su DIE fue 6.32 y 3.61 % mayor ($p \leq 0.05$) que en PC. La DIE de histidina, alanina, glutamina, glicina y prolina, en ambos ingredientes, fue similar ($p > 0.05$). La DIE de arginina, isoleucina, leucina, fenilalanina, valina, ácido aspártico, serina y tirosina en PS fue mayor ($p \leq 0.05$) comparado con PC. La DIE en el total de AA fue similar ($p > 0.05$) en ambas pastas proteicas (Cuadro 5).

Lo anterior es similar a lo encontrado por Adebiyi *et al.* (2015) en DIA en cerdos en crecimiento y los valores de DIE de proteína cruda, AA esenciales y no esenciales, y AA totales fueron mayores en la dieta con pasta de soya, comparados con la dieta

Cuadro 5. Digestibilidad ileal estandarizada de aminoácidos (%) en dietas a base de pastas de soya y canola suministradas a cerdos en finalización.

Variable	Dietas experimentales		EEM [†]	Valor <i>p</i> ≤
	Pasta de soya	Pasta de canola		
AA esenciales, %:				
Arginina	89.45 a	87.07 b	0.979	0.039
Histidina	85.11	84.37	1.151	0.361
Isoleucina	84.51 a	78.99 b	1.022	0.005
Leucina	84.08 a	81.25 b	0.970	0.019
Lisina	85.18 a	78.86 b	1.040	0.001
Metionina	86.69 b	90.30 a	1.039	0.001
Fenilalanina	84.22 a	82.02 b	1.027	0.015
Treonina	75.24 a	71.63 b	1.280	0.001
Valina	79.35 a	75.06 b	1.093	0.001
AA no esenciales, %:				
Alanina	76.50	77.81	1.839	0.221
Acido aspártico	81.46 a	78.25 b	1.345	0.011
Glutamina	83.87	86.37	1.746	0.182
Glicina	63.40	69.63	2.963	0.106
Prolina	71.41	73.52	8.430	0.515
Serina	81.82 a	76.83 b	0.995	0.001
Tirosina	85.00 a	82.21 b	0.887	0.001
Total	80.82	79.66	1.302	0.171

[†]Error estándar de la media. ^{ab}Medias por fila con literal distinta son diferentes ($p \leq 0.05$).

con pasta de canola. El valor de DIE de AA totales de la dieta con pasta de soya, obtenido por Adebiyi *et al.* (2015), es mayor al de la dieta con PS de esta investigación; en contraste, el valor de DIA de AA totales de la dieta con pasta de canola, según Adebiyi *et al.* (2015), fue menor, comparado con la dieta de PC de este estudio.

En esta investigación, la PS y PC evaluadas fueron de subproductos obtenidos post extracción de aceite a las semillas, las cuales se sometieron a procesos de calor y presión, por lo cual se pudo afectar la integridad de la proteína y, en consecuencia, la digestibilidad de los AA en ambos ingredientes (Landerio *et al.*, 2012). El control de calidad de los subproductos derivados de soya y canola debe considerar que el tratamiento con exceso de calor reduce la presencia de inhibidores de tripsina (IT), pero también puede aumentar las reacciones tipo Maillard, y en consecuencia afectar negativamente la digestibilidad de las proteínas y los aminoácidos. En especial, lisina y cistina, cuyo uso a nivel de metabolismo intermediario no sería posible para la síntesis de proteínas. En contraste, las semillas de soya y canola con calentamiento insuficiente, pueden tener gran parte de los IT presentes sin inactivar (Almeida *et al.*, 2014).

La diferencia en la digestibilidad de los AA también puede deberse a factores asociados con el origen y la variedad de la planta (Panagiota *et al.*, 2014). Según Woyengo *et al.* (2016), la pasta de canola *B. juncea* tuvo mayores coeficientes de DIE de AA totales, lisina

y valor de EN en comparación con la pasta de canola *B. napus*; en consecuencia, la primera aportó más AA digestibles a la dieta y energía neta para cubrir los requerimientos de cerdos en finalización.

Dietas con alto contenido de fibra cruda producen mayor pérdida de AA endógenos, debido a un mayor contacto de la fibra con la pared del tubo gastrointestinal, lo cual produce mayor descamación celular que no se contabiliza en la DIE (Zhengqun *et al.*, 2016). De acuerdo con Jha y Berrocoso (2016) la fibra dietética soluble puede afectar la digestibilidad de la proteína y AA debido a un aumento de la viscosidad de la digesta; en consecuencia, se reduce el contacto entre las enzimas, el contenido digestivo y la superficie de absorción en el intestino delgado. Así mismo, Liu *et al.* (2016b) indicaron que el contenido de lignina (LDA) y celulosa de la dieta pueden afectar la digestibilidad de los nutrientes por aumentar el volumen y velocidad de paso de la digesta en el tubo gastrointestinal del cerdo.

En esta investigación, el contenido de hemicelulosa (FDN) fue diferente entre dietas (Cuadro 3), pero este factor no afectó la DIA o DIE de los AA totales, como ocurrió en el estudio realizado por Adebiyi *et al.* (2015), en el cual los valores de FDN fueron similares a los de esta investigación. Zhang *et al.* (2013) indicaron que un nivel alto de fibra en la dieta de cerdos puede reducir la apetencia y el consumo de alimento, y también aumentar el nitrógeno endógeno y flujo de AA hacia el intestino; además de reducir la eficiencia de uso de la energía y la digestibilidad de la proteína y AA del alimento.

CONCLUSIONES

El contenido y valores de digestibilidad ileal aparente e ileal estandarizada de aminoácidos esenciales presentes en la pasta de soya fueron mayores en comparación con pasta de canola, excepto para metionina. La digestibilidad ileal aparente del total de aminoácidos, esenciales y no esenciales, fue similar en ambos ingredientes proteicos excepto lisina y treonina, con valores mayores en pasta de soya. Por esta disponibilidad, la capacidad de las preparaciones difiere al cubrir los requerimientos de cerdos en finalización.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia y a la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México, por el apoyo otorgado a través del proyecto de investigación con clave 3447/2013 CHT. Al Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California y a la Universidad de Missouri en Columbia, MO, EUA, por el apoyo en los análisis de laboratorio para medir los aminoácidos.

REFERENCIAS

Adebiyi AO, Ragland D, Adeola O, Olukosi O. 2015. Apparent or standardized ileal digestibility of amino acids of diets containing different protein feedstuffs fed at two crude protein levels for growing pigs. Asian-Australasian Journal of Animal Science 28: 1327–1334. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0914>

- Almeida FN, Htoo JK, Thomson J, Stein HH. 2014. Effects of heat treatments on the apparent and standardized ileal digestibility of amino acids in colza meal fed to growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 187: 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.09.009>
- AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). 2012. *Official Methods of Analysis*, 19th ed. Association Official Analytical Chemists. AOAC International. Arlington, VA, USA.
- Berrococo JD, Rojas OJ, Liu Y, Shoulders J, Gonzalez-Vega JC, Stein HH. 2015. Energy concentration and amino acid digestibility in high protein colza meal, conventional colza meal, and in soybean meal fed to growing pigs. *Journal of Animal Science* 93: 2208–2217. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8528>
- Bueckert RA, Clarke JM. 2013. Review: annual crop adaptation to abiotic stress on the Canadian prairies: six case studies. *Canadian Journal Plant Science* 93: 375–385. <https://doi.org/10.4141/cjps2012-184>
- Casas GA, Jaworski NW, Too JK, Stein HH. 2018. Ileal digestibility of amino acids in selected feed ingredients fed to young growing pigs. *Journal of Animal Science*. 96: 2361–2370. <https://dx.doi.org/10.1093%2Fjas%2Fsky114>
- Cervantes RM, Vizcarra VV, Rodriguez RS, Gonzalez MJS, Flores AL. 1999. Canulación duodenal e ileal para estudios de digestión en cerdos. *Agrociencia* 34: 135–139. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30234203> (Retrieved: July 2021).
- Fenton TW, Fenton M. 1979. An improved procedure for the determination of chromic oxide in feed and faeces. *Canadian Journal of Animal Science* 59: 631–634. <https://doi.org/10.4141/cjas79-081>
- Jha R, Berrococo J. 2016. Dietary fibre and protein fermentation in the intestine of swine and their interactive effects on gut health and on the environment: A review. *Animal Feed Science and Technology* 212: 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.12.002>
- Kong C, Kang HG, Kim BG, Kim KH. 2014. Ileal digestibility of amino acids in meat meal and soybean meal fed to growing pigs. *Asian Australasian Journal of Animal Science* 27: 990–995. <https://dx.doi.org/10.5713%2Fajas.2014.14217>
- Lagos LV, Stein HH. 2017. Chemical composition and amino acids digestibility of soybean meal produced in the United States, China, Argentina, Brazil, or India. *Journal of Animal Science* 95: 1626–1636. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1440>
- Landerio JL, Beltranena E, Cervantes M, Araiza AB, Zijlstra RT. 2012. The effect of feeding expeller-pressed colza meal on growth performance and diet nutrient digestibility in weaned pigs. *Animal Feed Science and Technology* 17: 240–245. <https://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.11.004>
- Liu Y, Jaworski NW, Rojas OJ, Stein HH. 2016a. Energy concentration and amino acids digestibility in high protein colza meal, conventional colza meal, and in soybean meal fed to growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 212: 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.11.017>
- Liu Z, Zhang SLV, Lui J, Zhang H. 2016b. Effects of dietary cellulose levels on the estimation of endogenous amino acids losses and amino acids digestibility for grower pigs. *Animal Nutrition* 2: 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.04.001>
- Mejicanos G, Sanjayan I, Kim H, Nyachoti CN. 2016. Recent advances in colza meal utilization in swine nutrition. *Journal Animal Science and Technology* 58: 7–19. <https://dx.doi.org/10.1186%2Fsa40781-016-0085-5>
- Moughan JP, Miner WW. 2013. Determination of protein digestibility in the growing pigs. In *Nutritional and physiological functions of amino acids in pigs*, Blachier F, Wu G, Yin Y (Ed.); Springer: Vienna, Austria, 251–271. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-1328-8_17
- Nawas SR, Yao JJ, Hussain RAI, Abdalla EMM, Ahmed SS, Musa BB, Yang X. 2017. Endogenous amino acids losses (EAAL) in growing pigs influence on methodology and factors are affecting – a Review. *Scholars Journal Agriculture and Veterinary Science* 4: 35–46. <https://saspublishers.com/sjavs/> (Retrieved: July 2021).
- NRC (National Research Council). 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 11th ed. National Academy Press, Washington, DC, USA. 420 p. <https://www.worldcat.org/title/nutrient-requirements-of-swine/oclc/794624630> (Retrieved: July 2021)
- OIRSA (Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria). 2017. Guía rápida para la elaboración de muestreos estadísticos en los programas de vigilancia epidemiológica: microbiológicos y residuos tóxicos. Dirección Regional de Inocuidad de Alimentos. El Salvador, San Salvador, C. A. <https://www.oirsa.org/contenido/biblioteca/Gu%C3%ADa%20>

- r%C3%A1pida%20de%20muestreo%20estad%C3%ADstico%20en%20Inocuidad%20Alimentaria%20-%20OIRSA.pdf (Retrieved: May 2021).
- Ruiz N, Parsons CM, Stein HH, Coon CN, van Eys JE, Miles RD. 2020. A review: 100 years of soybean meal. *Feedstuffs* <https://www.feedstuffs.com/print/40435> (Retrieved: May 2021).
- Oliveira MS, Stein HH. 2016. Digestibility of energy, amino acids, and phosphorus in a novel source of soy protein concentrate and in soybean meal fed to growing pigs. *Journal of Animal Science* 94: 3343–3352. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0505>
- Panagiota FP, Efterpi C, Ilias G, Eleftherios B, Ioannis S, Anastasios T, Athina T, Jian P. 2014. Alternative protein sources to soybean meal in pigs diets. *Journal of Food Agriculture and Environment* 12: 655-660. <http://www.world-food.net/> (Retrieved: July 2021).
- SAGARPA - DOF. 2001 (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación en el Diario Oficial de la Federación). Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999. Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio. Diario Oficial de la Federación 2001. Dirección General Jurídica, SAGARPA, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/203498/NOM-062-ZOO-1999_220801.pdf (Retrieved: July 2021).
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Naturales, Pesca y Alimentación). 2017. Oleaginosas, colza, cártamo, girasol, soya mexicana. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Ciudad de México, México. 46 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256431/B_sico-Oleaginosas-parte_una.pdf (Retrieved: July 2021).
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. 1028 p.
- Stein HH, Sève B, Fuller MF, Moughan PJ, de Lange CF. 2007. Invited review: amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: terminology and application. *Journal of Animal Science* 81: 172–180. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-742>
- Van Soest PJ, Roberson JB, Lewis BA. 1991. Methods for dietary fibre, neutral detergent and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74: 3583-3897. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(91)78551-2)
- Woyengo TA, Beltranena E, Zijlstra RT. 2014. Controlling feed cost by including alternative ingredients into pig diets: a review. *Journal of Animal Science* 92: 1293–1305. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7169>
- Woyengo TA, Sánchez JE, Yañez J, Beltranena E, Cervantes M, Morales A, Zijlstra RT. 2016. Nutrient digestibility of colza co-products for grower pigs. *Animal Feed Science and Technology* 222: 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.09.009>
- Zhang W, Li D, Liu L, Zhang J, Duan Q, Yang W, Zhang L. 2013. The effects of dietary fibre level on nutrient digestibility in growing pigs. *Journal Animal Science and Biotechnology* 4: 17–24. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-17>
- Zhengqun L, Shuaibing LV, Shiuyan Z, Jingbo L, Hongfu Z. 2016. Effects of dietary cellulose levels on the estimation of endogenous amino acids losses and amino acid digestibility for growing pigs. *Animal Nutrition* 2: 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.04.001>



SODIUM CHLORIDE ON BIOACTIVE COMPOUNDS OF EGGPLANT (*Solanum melongena* L.) GROWN IN HYDROPONICS UNDER TWO PROTECTED STRUCTURES

Ana Yesenia Lara-Izaguirre¹, Ángel Natanael Rojas-Velázquez^{1*}, Irán Alía-Tejaca²,
Jorge Alonso Alcalá-Jáuregui¹

¹ Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Carretera San Luis Potosí-Matehuala km 14.5, Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. C. P. 78321.

² Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Avenida Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México. C. P. 62209.

* Corresponding author: angel.rojas@uaslp.mx

ABSTRACT

The consumption of fruits and vegetables of nutritional quality increases due to their high amounts of bioactive compounds with antioxidant activity, to prevent diseases and improve health. The hypothesis is that salinity, light and temperature in different protected structures influence the chemical composition and nutritional value of eggplant (*Solanum melongena* L.) fruits. The objective was to evaluate the effect of different doses of sodium chloride (NaCl) on the concentration of bioactive compounds in eggplant fruits grown in hydroponics under greenhouse and shade mesh. Eggplants were grown in a hydroponic system in pots with tezontle. The experimental design was completely randomized with a 4 × 2 factorial arrangement, four doses of NaCl (0, 15, 30 and 45 mM) and two protected structures (greenhouse and shade mesh). The variables evaluated were fruit weight, firmness, total soluble solids (SST), titratable acidity (AT), sodium, vitamin C, phenols, total flavonoids and antioxidant activity. Fruits obtained from plants grown in greenhouses with 45 mM NaCl decreased 35.9 % in weight compared to fruits from the 30 mM NaCl shade mesh treatment; and increased 51.9 % in firmness compared to the 15 mM NaCl treatment under shade mesh. The 15 mM NaCl dose under shade mesh increased SST by 95.8 % compared to the 30 mM NaCl treatment in the greenhouse. Under shade mesh without salinity, the highest AT in fruits was obtained; also, it was observed that the AT of fruits under shade mesh was 60.5 % higher than the AT of fruits in the greenhouse; regardless of the NaCl dose. The highest fruit concentration was found in the 45 mM NaCl treatment in the greenhouse. Under shade mesh with 15 mM NaCl dose, the lowest concentration of vitamin C in fruit was recorded, being 37 % lower than the concentration of vitamin C with the same dose in the greenhouse. No significant differences were found in phenols and total flavonoids. Fruits from plants under shade mesh with the 30 mM NaCl dose had 165.2 % more antioxidant capacity than fruits from plants under shade mesh without salinity. It is concluded that the environmental conditions of temperature and radiation in the greenhouse promoted an increase in the concentration of bioactive compounds in eggplant fruits, which provides greater nutritional value.

Keywords: environment, antioxidants, stress, health, *Solanum melongena* L.

Citation: Lara-Izaguirre AY, Rojas-Velázquez AN, Alía-Tejaca I, Alcalá-Jáuregui JA. 2022. Sodium chloride on bioactive compounds of eggplant (*Solanum melongena* L.) grown in hydroponics under two protected structures. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2732>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: July 07, 2021.
Approved: February 21, 2022.
Estimated publication date:
March 14, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 207-232.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCTION

Eggplant (*S. melongena*) is an agronomically important plant, grown and consumed in many countries (Cericola *et al.*, 2014), contains bioactive compounds considered as nutraceuticals (Lo Scalzo *et al.*, 2016). It is among the top 10 vegetables in terms of antioxidant content (Philippi *et al.*, 2016). The consumption of fruits and vegetables containing these compounds, have a beneficial effect on health as it helps in the prevention of various diseases in humans (Perin *et al.*, 2019).

The generation of technology or agronomic practices that positively regulate the synthesis and accumulation of secondary metabolites in plants is important to influence the antioxidant content in fruits (Perin *et al.*, 2019). Some practices that can be used include fertilizer application, planting date, irrigation efficiency and maturity at harvest, in addition to environmental factors, such as soil moisture, temperature and solar radiation, which stimulate the concentration of certain metabolites (Zou *et al.*, 2016). Light conditions inside a greenhouse change according to the cover materials, by filtering solar radiation or reducing light intensity. These materials are associated with plant quality, in visual properties, organoleptic properties and chemical composition (Rouphael *et al.*, 2018). Environmental changes affect the production of phenolic compounds as a response and adaptation mechanism of plants (Bacha *et al.*, 2017). In strawberry varieties grown under high radiation, the content of total phenols and flavonoids increased (Cervantes *et al.*, 2019) and in tomato plants grown under high temperature, the concentration of vitamin C increased (Botella *et al.*, 2021).

On the other hand, the response of greenhouse vegetables to salt stress depends on different factors, including genetic material, climatic conditions, phenological stage, duration of stress exposure, concentration and type of salt (Rouphael *et al.*, 2018). Salinity by NaCl can cause positive effects on fruit quality, improves bioactive compounds such as vitamin C and antioxidant activity (Petropoulos *et al.*, 2017). With doses of 25 and 50 mM NaCl increases flavonoid content in eggplant (Shishira *et al.*, 2016). Doses of 60 mM NaCl in thyme (*Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* L.) increase total phenols (Bistgani *et al.*, 2019); likewise, 50 mM NaCl dose increases antioxidant activity in edible flowers of *Tagetes patula* L. (Chrysargyris *et al.*, 2018).

According to the above, environmental conditions and salinity affect crop quality, chemical composition and nutritional value. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of different doses of sodium chloride (NaCl) on the concentration of bioactive compounds of eggplant fruits grown in hydroponics in greenhouse and under shade mesh.

MATERIALS AND METHODS

Plant material and growing conditions

The experiment was conducted in the summer-autumn cycle (June-December) of 2019, in the hydroponics area of the Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine, in San Luis Potosi, Mexico. The structures used were a tunnel type greenhouse with dimensions 5.5 x 18 m with a white plastic cover and a chapel type shade mesh with the

same dimensions and a black mesh cover. In the greenhouse, the average temperature was 23 °C with an average light intensity of 325.74 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; under the shade mesh the average temperature was 17 °C with an average light intensity of 183.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. This was measured with a HOBO logger (Onset UA-002-08 Pendant Temperature/Light Data Logger) in each structure.

Eggplant 'Black Beauty' (Caloro®) was used as plant material with a germination percentage of 85 %, which was sown in polystyrene trays with 220 cavities, with a commercial substrate based on acid peat BM2 Berger®. At 60 d after sowing, they were transplanted to 10 L black plastic pots, with red tezontle as substrate with a granulometry of 5 to 6 mm. Seedlings with 12 cm height and four true leaves were used for transplanting, with 80 seedlings in each protected structure with a total of 160 plants, under a drip irrigation system.

The crop was irrigated with Steiner's universal solution (molc m^{-3}): 12 NO_3^- , 7 SO_4^{2-} , 1 H_2PO_4^- , 9 Ca^{+2} , 7 K^+ and 4 Mg^{+2} . The fertilizers used were $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 and H_3PO_4 . Micronutrients were added from Carboxy® Micro, which provided in mg L^{-1} : Fe 0.5, Zn 0.25, Mn 0.1, Mg 0.05 and B 0.05 in EDDHA chelated form. The pH of the solution was adjusted with H_3PO_4 to 5.5.

At 54 d after transplanting (start of flowering), the treatments were applied to the two structures, NaCl (J. T. Baker™, USA) was added to the Steiner solution at four doses: 0 (as control), 15, 30 and 45 mM.

Treatment design and experimental design

The experiment was conducted in a completely randomized design. The treatments had a 4×2 factorial arrangement, where the four doses of NaCl were 0, 15, 30 and 45 mM and two protected structures, greenhouse and shade mesh. The experimental unit was one plant and 20 replicates per treatment were established.

Determination of weight at harvest, firmness and sodium concentration in fruits

Mature fruits were harvested when they acquired a shiny black coloration, this was from 105 d after the application of the treatments and were weighed on a digital scale (Ohaus® PAJ4102N Gold series, USA), the weight was reported in grams. Firmness was measured with a penetrometer (QA Supplies, USA) with 11 mm plunger tip. For sodium concentration in the fruit, a two gram portion of the fruit was cut, ground in a mortar and pestle, and four drops were added to the ionometer for readings (Na+ Laqua Twin Compact Ion Meter, Horiba, Kyoto, Japan).

Determination of bioactive compounds in fruits

For the evaluation of the concentration of bioactive and organoleptic compounds, four samples of ripe fruits were taken per treatment 100 d after the application of the treatments, washed with distilled water and dried in a forced air drying oven (Omron, Kyoto, Japan) at 70 °C until a constant weight was obtained. The dried fruits were ground (Krupps mill, Mexico) to obtain powder, which was used for the analysis.

Total soluble solids (SST) and titratable acidity (AT)

Extracts were prepared with 0.1 g of dry sample in 12 mL of distilled water in a digital T 25 homogenizer (ULTRA-TURRAX®, IKA, USA) and filtered to determine total soluble solids and titratable acidity.

SST were determined in two drops of the filtrate which were placed in a digital pocket refractometer (PAL-1, Atago®, Japan) and the results were reported in °Brix. AT was determined according to the methodology described by AOAC (1990), using phenolphthalein as indicator and the results were expressed as percentage of citric acid.

Vitamin C

For vitamin C analysis, 0.1 g of dry fruit sample was homogenized in 11 mL of distilled water in a digital T 25 homogenizer (ULTRA-TURRAX®, IKA, USA) and filtered. Ascorbic acid was determined according to the spectrophotometric method described by da Silva *et al.* (2017) with some modifications. Briefly, 1 mL of homogenized and filtered sample was added to a beaker, 1 mL of a 1.5 % (w/v) acetate-urea solution, 3 mL of a 0.075 % (w/v) cupric acetate-cuproin solution and 5 mL of absolute ethanol. The absorbance was measured at 545 nm. Quantification was performed with an ascorbic acid calibration curve and the results are reported as ascorbic acid (AA) concentration in mg mL⁻¹.

Phenols

Total phenols were determined using the Folin-Ciocalteu spectrophotometric method (Singleton *et al.*, 1999), with some modifications. For the extract, 0.1 g of dry fruit sample was homogenized in 11 mL of distilled water in a digital T 25 homogenizer (ULTRA-TURRAX®, IKA) and filtered. 200 µL of the sample was placed with 300 µL of distilled water in test tubes, plus 2.5 mL of Folin-Ciocalteu and 2 mL of NaCO₃. The samples were left to stand in a dark chamber for 2 h and the absorbance was measured at 760 nm. The standard curve was performed with gallic acid and the results are expressed in mg gallic acid equivalents (EAG) g⁻¹ dry weight.

Flavonoids

The concentration of total flavonoids was determined according to the modified AlCl₃ method (Arvouet-Grand *et al.*, 1994). For the extract, 0.2 g of dry sample was used in 12 mL of absolute methanol in a digital T 25 homogenizer (ULTRA-TURRAX®, IKA, USA) and filtered. From this sample, 2.5 mL were taken and 2 mL of AlCl₃ were added and incubated in a dark chamber for 10 min. The absorbance of the samples was measured at 415 nm in a UV-Vis spectrophotometer (GENESYS 10S, Thermo Scientific™, USA). A quercetin standard curve was performed and the results were expressed as mg quercetin equivalents (EQ) g⁻¹ dry weight.

Antioxidant activity

Antioxidant activity was determined by the ABTS method described by Terán-Erazo *et al.* (2019).

Statistic analysis

With the data obtained, analysis of variance and Tukey mean comparison tests ($p \leq 0.05$) were performed using the SAS statistical program v. 9.0 (SAS Institute Inc., 2002). In addition, a correlation analysis (Pearson correlation coefficients) and a principal component analysis were performed with Minitab v. 16 statistical package (Minitab Institute Inc., 2010).

RESULTS AND DISCUSSION

Fruit weight

Eggplant fruit weight was influenced by the climatic conditions in the structures used; the interaction of the study factors caused significant differences (Table 1). Fruits obtained from eggplant plants grown in greenhouses with 45 mM NaCl were 35.9 % lighter than fruits from the 30 mM NaCl treatment with shade mesh (Table 1). In this study, fruit weight was more affected by NaCl when the greenhouse temperature was 23 °C. In eggplant, it has been reported that, mean air temperature between 22 and 19 °C in greenhouse increases fruit weight compared to those grown at temperatures of 11 °C (Valerga *et al.*, 2019). In tomato grown at 25 °C, the application of 60 mM NaCl decreased fruit weight by 35 %; with temperature of 35 °C, NaCl decreased fruit weight by 58 % in regard to the control grown with 1 mM NaCl at 25 °C (Botella *et al.*, 2021). On the other hand, salinity caused by the administration of 30, 60 and 90 mM NaCl decreased yield in native Mexican tomato genotypes, with the greatest decreases recorded in Campeche, in the order of 71.1, 80.1 and 89.6 %, respectively, all cases compared to the control without salinity (Ladewig *et al.*, 2021).

Table 1. Quality of eggplant fruits grown under two types of protected structures and different doses of NaCl.

Factor Level	Fruit weight (g)	Firmness (kg)	Total soluble solids (°Brix)	Titrateable acidity (%)
Interaction (EP × NaCl)				
I [†] , 0	428.43 ab	7.67 abc	8.40 bc	3.57 c
I, 15	453.73 ab	7.50 abc	7.50 bc	2.91 c
I, 30	431.30 ab	8.30 ab	7.20 c	2.83 c
I, 45	346.00 b	9.22 a	9.30 abc	3.36 c
MS [‡] , 0	414.38 ab	7.70 abc	12.60 ab	6.48 a
MS, 15	500.20 a	6.07 c	14.10 a	6.16 ab
MS, 30	539.85 a	6.85 bc	9.30 abc	3.97 bc
MS, 45	463.70 ab	6.17 c	9.00 abc	3.73 c
DMSH [§]	147.22	2.02	5.28	22.21
CV [¶]	14.05	11.63	23.34	22.92

Means with different letters in each column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$). [†]I: greenhouse; [‡]MS: shade netting; [§]DMSH: least significant difference; [¶]CV: coefficient of variation.

Firmness

Fruits grown in greenhouse and with 45 mM NaCl doses had 51.9 % higher firmness compared to 15 mM NaCl under shade mesh, this effect can be attributed to increased light and temperature (Table 1). In contrast, Valerga *et al.* (2019) mentioned that firmness in eggplant fruits grown in greenhouse showed dissimilar changes according to harvest conditions; at temperatures of 22 °C, it decreased 38 % compared to temperatures of 11 °C. In tomato plants grown at 35 °C with 60 mM NaCl, fruit firmness decreased by 22 % in relation to fruit grown at 25 °C (Botella *et al.*, 2021). In tomato fruits with doses of 30 mM NaCl did not affect firmness, in contrast, with doses of 60 and 90 mM it increased by 10 % (Naeem *et al.*, 2020). Garriga *et al.* (2015) mentioned that the toxicity effects of Na⁺ and Cl⁻ ions increase the activity of pectinases and other enzymes that degrade cell wall, therefore, firmness decreases.

Total soluble solids

The 15 mM NaCl dose in combination with shade mesh increased SST in fruits by 95.8 % compared to 30 mM NaCl doses in greenhouse (Table 1). Ilić and Fallik (2017) report that under black mesh the transmission of blue light is higher and therefore, the plant has higher photosynthate production, which increases soluble solids in fruits. Also, high doses of NaCl promote higher SST content; in tomato plants grown with 60 mM NaCl at 25 and 35 °C, total soluble solids increased by 15 and 10 %, compared to the control with 1 mM NaCl (Botella *et al.*, 2021). In native tomato genotypes, doses 30, 60 and 90 mM NaCl caused increases from 25 % in total soluble solids (Ladewig *et al.*, 2021). Also in tomato, the addition of 50 and 100 mM NaCl to the nutrient solution increased total soluble solids by 80 % compared to the control (Carbajal-Vázquez *et al.*, 2020). In eggplant crop, upon application of 40 mM NaCl sugars such as sucrose, glucose and fructose accumulated in response to salt stress, as they function as osmolytes to maintain cell turgor and protect membranes and proteins (Hannachi and Van Labeke, 2018).

Titrateable acidity

The highest fruit AT was obtained in plants grown under shade mesh and without salinity, which exceeded by 128.9 % the value of fruits of plants treated with 30 mM NaCl in the greenhouse. Likewise, the treatment without salinity under shade mesh resulted in an average increase of 104.5 % in fruit AT compared to the value of fruits obtained in the greenhouse with all NaCl levels (0, 15, 30 and 45 mM; Table 1). Salt stress caused by the addition of 50 and 100 mM NaCl to the nutrient solution increased titrateable acidity by 63.6 and 65.9 % in tomato fruits, compared to the control (Carbajal-Vázquez *et al.*, 2020). Likewise, in tomato fruits from plants treated with 60 mM NaCl at 25 °C increased acidity by 26 %; whereas, at 35 °C there was no effect of NaCl (Botella *et al.*, 2021). In tomato, acidity increased by 39 % with 50 mM NaCl, which was attributed to the increase in the content of organic acids involved in the osmoregulation mechanism of plants under high salinity conditions (Costan *et al.*,

2020). On the contrary, in pepper fruits the application of 20.1 mM NaCl had no effect on titratable acidity (Giuffrida *et al.*, 2014).

Sodium in fruits

Fruits from plants grown in greenhouses with 45 mM NaCl doses showed higher sodium concentrations, exceeding on average 60 % of fruits from plants treated with 30 and 45 mM NaCl under shade mesh (Figure 1). In 'Black Beauty' eggplant plants, NaCl stress elicited an osmoregulatory response by accumulating Na⁺ and Cl⁻ and decreasing K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and NO₃⁻ (Hannachi and Van Labeke, 2018). The WHO recommends an intake of 2 g Na⁺ day⁻¹ in adults (WHO, 2012). In this case, assuming an annual per capita consumption of eggplant of 700 g in Mexico, the sodium concentration obtained in this study with doses of 30 and 45 mM NaCl in greenhouse-grown fruits represents only 11 % of the recommended daily intake, therefore, the consumption of eggplant fruits with NaCl doses does not represent any health risk.

Flavonoids

The type of structure where the eggplant was grown, the application of NaCl doses and the interaction of the factors under study did not significantly affect the concentration of flavonoids in the fruits (Table 2). Contrary to what was observed here, Cervantes *et al.* (2019) found that flavonoid content increased 29 % in strawberry 'Fortuna' fruits exposed to light intensity of 1100 µmol m⁻² s⁻¹ in macrotunnel, with respect to 440 µmol m⁻² s⁻¹. Brenes *et al.* (2020) found no effect on total flavonoids in eggplant plants with doses of 50, 100, 200 and 300 mM NaCl. In contrast, Shishira *et al.* (2016) indicated that in eggplant under salt stress the amount of total flavonoids increased with doses of 25 and 50 mM NaCl by 26 and 64 % compared to the control without salinity.

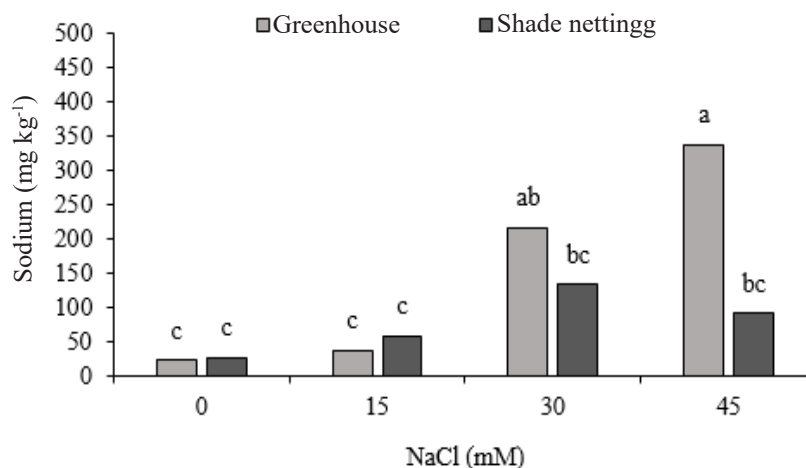


Figure 1. Sodium concentration in eggplant fruits from plants in response to the interaction protected structure and NaCl dose. Means with different letters in each subfigure are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

Table 2. Concentration of flavonoids and total phenols in eggplant fruits grown under two types of protected structures and different doses of NaCl.

Factor Level	Total flavonoids (mg EQ g ⁻¹)	Total phenols (mg EAG g ⁻¹)
Protected structure (EP)		
I	73.92 a	507.93 a
M	74.79 a	429.81 b
DMSH	11.36	77.44
NaCl (mM)		
0	74.35 a	519.64 a
15	71.33 a	514.91 a
30	72.82 a	381.13 a
45	78.92 a	459.80 a
DMSH	21.65	147.56
Interaction (EP × NaCl)		
I [†] , 0	71.65 a	517.09 a
I, 15	66.93 a	543.31 a
I, 30	74.64 a	467.56 a
I, 45	82.60 a	503.74 a
MS [‡] , 0	77.07 a	522.19 a
MS, 15	75.74 a	486.50 a
MS, 30	71.02 a	294.70 a
MS, 45	75.34 a	415.85 a
DMSH [§]	37.00	252.18
CV ^b	20.48	22.14

Means with different letters in each column and study factor are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$). [†]I: greenhouse; [‡]MS: shade netting; [§]DMSH: least significant difference; ^bCV: coefficient of variation.

Phenols

Fruits harvested from greenhouse-grown plants showed 18.1 % higher phenolic concentrations than fruits of plants under shade mesh (Table 2). Light intensity under shade mesh was 183 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and in greenhouse 326 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, which increased the total phenolic concentration. With the doses of NaCl applied, no significant differences were detected in phenols in fruits (Table 2), the concentrations ranged between 400 and 580 mg EAG 100 g⁻¹. Brenes *et al.* (2020) found that doses of 50, 100, 200 and 300 mM NaCl did not affect the total phenolic content in eggplant plants. In the interaction of the two factors under study, no significant differences in phenols in fruits were found (Table 2). Bacha *et al.* (2017) mentioned that the production and accumulation of phenolic compounds is a response and adaptation mechanism of plants exposed to stressful conditions.

Vitamin C

The interaction of the two factors under study had significant effects on the concentration of vitamin C in fruits (Figure 2A). Fruits from plants grown with 0, 15

and 45 mM NaCl doses in greenhouse and without salinity under shade mesh had on average 33 % and 41 % higher vitamin C concentration than fruits from plants treated with 45 mM NaCl and 15 mM NaCl under shade mesh, respectively. The 50 mM NaCl dose did not cause differences in vitamin C content in tomato fruits (Costan *et al.*, 2020) and with the application of 30 to 90 mM NaCl, it increased from 11 to 25 % (Naeem *et al.*, 2020). In tomato plants, vitamin C concentration increased by 16 and 26 % with doses of 1 and 60 mM NaCl with high temperature 35 °C, relative to 25 °C, indicating the effect of heat stress and no effect of salinity (Botella *et al.*, 2021). Fenech *et al.* (2019) mentioned that hydrogen peroxide (H_2O_2) is responsible for light-induced oxidative damage. Under high irradiance conditions during photosynthesis, ascorbate is involved in the removal of excess H_2O_2 (Wheeler *et al.*, 2015). In this study, the increase in vitamin C concentration could be due to the light intensity in the greenhouse which was $325.74 \mu\text{mol m}^{-2}$, higher than that recorded under shade mesh ($183.22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

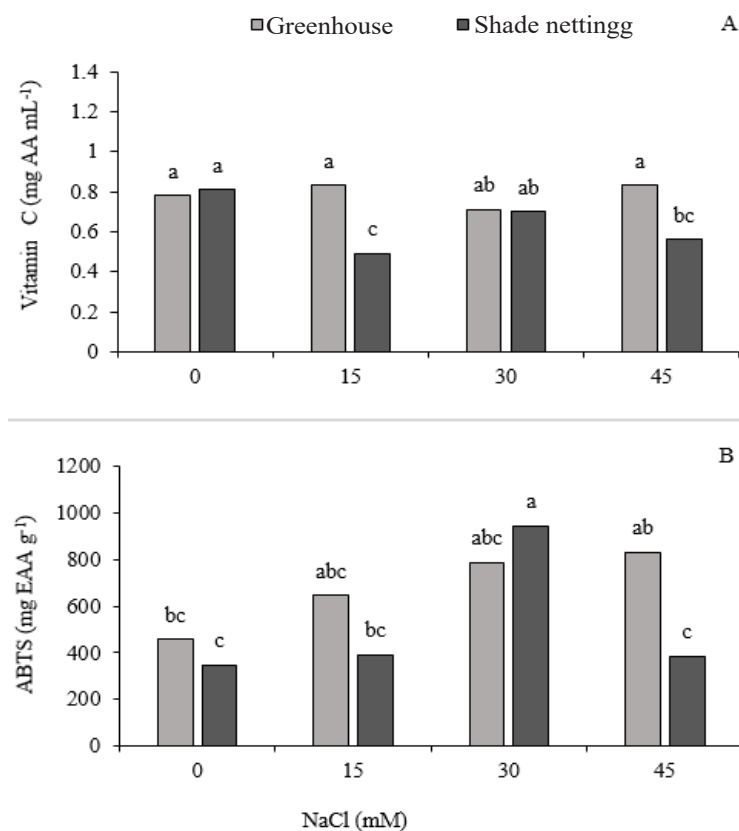


Figure 2. Vitamin C concentration and ABTS antioxidant activity in eggplant fruits from plants grown in response to protected structure and NaCl dosage. Means with different letters in each subfigure are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

Antioxidant activity

The interaction of the factors under study had a significant effect on antioxidant activity (Figure 2B). Fruits from plants under shade mesh with the 30 mM NaCl dose increased 165.2 % antioxidant capacity compared to fruits from plants produced under shade mesh without salinity. According to Khanahmadi *et al.* (2010) upon salt stress induction plants increase antioxidant substances for their defense against oxidative stress. In the greenhouse, the light intensity was $326 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and under the shade mesh it was $183 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, suggesting an increase in antioxidant activity. Plants accumulate a number of phenolic compounds and antioxidants as a protective measure against intense light and UV rays (Ilić and Fallik, 2017). Antioxidant activity increased in edible flowers of *Tagetes patula* L. by 11 % with the dose 50 mM NaCl (Chrysargyris *et al.*, 2018).

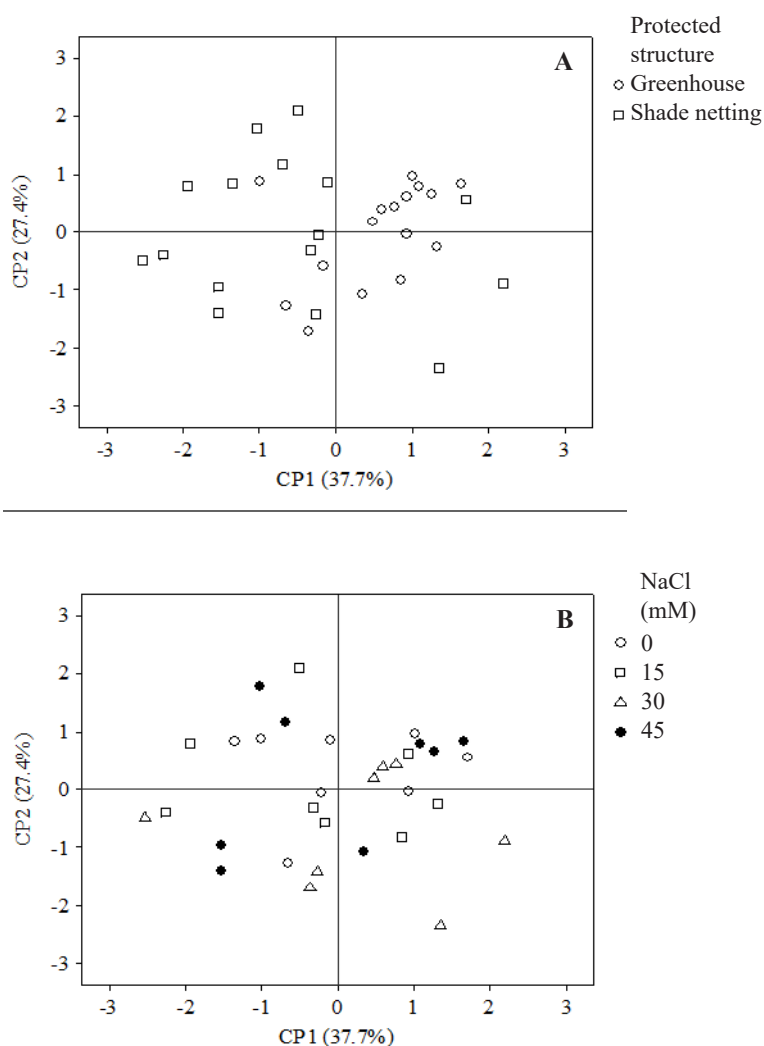


Figure 3. Point distribution derived from principal component analysis of eggplant bioactive compounds in two protected structures and NaCl doses.

Principal component analysis

Principal component analysis was performed on the original data set of bioactive compounds in fruits. The first three components explained 88.6 % of the variability in the data (37.7, 27.4, 23.5 %) obtained from the six bioactive compounds analyzed. The scatter plot was done with PC1 and PC2, which together explained 65.1 % of the variability in the original data (Figures 3A-B). In PC1, the positive correlations with the highest values were ABTS antioxidant activity (0.59) and vitamin C (0.70). Antioxidant activity increases when inducing stress to plants (Chrysargyris *et al.*, 2018). Moreover, ascorbic acid acts effectively in response to oxidative stress, it depends on the need generated by the plant environment and physiological situation (Shishira *et al.*, 2016). In PC2, the positive correlations with higher values were phenols (0.58) and flavonoids (0.75). The influence of protected greenhouse structure as well as NaCl doses shows data that have an effect on this variability. Also, a group of data distant from the axis related to the 30 mM NaCl dose was distinguished.

CONCLUSIONS

Eggplant production in greenhouse with doses of 30 and 45 mM NaCl increased vitamin C concentration and antioxidant activity in fruits. Under shade mesh, the 30 mM NaCl dose increased antioxidant activity. Thus, the environmental conditions of temperature and radiation in the greenhouse promoted an increase in the concentration of bioactive compounds in eggplant fruits, which in turn provides greater nutritional value.

REFERENCES

- AOAC. 1990. Official Methods and Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Helrich, K. (ed.). Arlington, Virginia USA. 1298 p.
- Arvouet-Grand A, Vennat B, Pourrat A, Legret P. 1994. Standardisation dun extrait de propolis et identification des principaux constituents. *Journal Pharmacie de Belgique* 49 (6): 462–468.
- Bacha H, Tekaya M, Drine S, Guasmi F, Touil L, Enneb H, Triki T, Cheour F, Ferchichi A. 2017. Impact of salt stress on morpho-physiological and biochemical parameters of *Solanum lycopersicum* cv. Microtom leaves. *South African Journal of Botany* 108: 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.08.018>
- Bistgani ZE, Hashemi M, DaCosta M, Craker L, Maggi F, Morshedloo MR. 2019. Effect of salinity stress on the physiological characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of *Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* Celak. *Industrial Crops and Products* 135 (1): 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.055>
- Botella MÁ, Hernández V, Mestre T, Hellín P, García-Legaz MF, Rivero RM, Martínez V, Fenoll J, Flores P. 2021. Bioactive compounds of tomato fruit in response to salinity, heat and their combination. *Agriculture* 11 (6): 534. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060534>
- Brenes M, Solana A, Boscaiu M, Fita A, Vicente O, Calatayud A, Prohens J, Plazas M. 2020. Physiological and biochemical responses to salt stress in cultivated eggplant (*Solanum melongena* L.) and in *S. insanum* L., a close wild relative. *Agronomy* 10 (5): 651. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050651>
- Carbajal-Vazquez VH, Gomez-Merino FC, Herrera-Corredor JA, Contreras-Oliva A, Alcantar-Gonzalez G, Trejo-Téllez LI. 2020. Effect of titanium foliar applications on tomato fruits from plants grown under salt stress conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 48 (2): 924–937. <https://doi.org/10.15835/nbha48211904>
- Cericola F, Portis E, Lanteri S, Toppino L, Barchi L, Acciarri N, Pulcini L, Sala T, Rotino GL. 2014. Linkage disequilibrium and genome-wide association analysis for anthocyanin pigmentation and fruit color in eggplant. *BMC Genomics* 15: 896. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-896>

- Cervantes L, Ariza MT, Gomez-Mora JA, Miranda L, Medina JJ, Soria C, Martínez-Ferri E. 2019. Light exposure affects fruit quality in different strawberry cultivars under field conditions. *Scientia Horticulturae* 252 (4): 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.058>
- Chrysargyris A, Tzionis A, Xylia P, Tzortzakis N. 2018. Effects of salinity on tagetes growth, physiology, and shelf life of edible flowers stored in passive modified atmosphere packaging or treated with ethanol. *Frontiers in Plant Science* 9: 1765. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01765>
- Costan A, Stamatakis A, Chrysargyris A, Petropoulos SA, Tzortzakis N. 2020. Interactive effects of salinity and silicon application on *Solanum lycopersicum* growth, physiology and shelf-life of fruit produced hydroponically. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100 (2): 732–743. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10076>
- da Silva TL, Aguiar-Oliveira E, Mazalli MR, Kamimura ES, Maldonado RR. 2017. Comparison between titrimetric and spectrophotometric methods for quantification of vitamin C. *Food Chemistry* 224: 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.052>
- Fenech M, Amaya I, Valpuesta V, Botella M.A. 2019. Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation. *Frontiers in Plant Science* 9: 2006. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.02006>
- Garriga M, Muñoz CA, Caligari PD, Retamales JB. 2015. Effect of salt stress on genotypes of commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*). *Scientia Horticulturae* 195: 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.036>
- Giuffrida F, Graziani G, Fogliano V, Scuderi D, Romano D, Leonardi C. 2014. Effects of nutrient and NaCl salinity on growth, yield, quality and composition of pepper grown in soilless closed system. *Journal of Plant Nutrition* 37: 1455–1474. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.881874>
- Hannachi S, Van Labeke MC. 2018. Salt stress affects germination, seedling growth and physiological responses differentially in eggplant cultivars (*Solanum melongena* L.). *Scientia Horticulturae* 228: 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.002>
- Ilić ZS, Fallik E. 2017. Light quality manipulation improves vegetable quality at harvest and postharvest: A review. *Environmental and Experimental Botany* 139: 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.006>
- Khanahmadi M, Rezazadeh SH, Taran M. 2010. *In vitro* antimicrobial and antioxidant properties of *Smyrniun cordifolium* Boiss. (Umbelliferae) extract. *Asian Journal of Plant Sciences* 9 (2): 99–103. <https://doi.org/10.3923/ajps.2010.99.103>
- Ladewig P, Trejo-Téllez LI, Servín-Juárez R, Contreras-Oliva A, Gomez-Merino FC. 2021. Growth, yield and fruit quality of Mexican tomato landraces in response to salt stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 49 (1): 12005–12005. <https://doi.org/10.15835/nbha49112005>
- Lo Scalzo RL, Fibiani M, Francese G, D'Alessandro A, Rotino GL, Conte P, Mennella G. 2016. Cooking influence on physico-chemical fruit characteristics of eggplant (*Solanum melongena* L.). *Food Chemistry* 194: 835–842. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.063>
- Minitab Inc. 2010. Statistical Software; Minitab version 16: State College, PA, USA.
- Naeem M, Basit A, Ahmad I, Mohamed HI, Wasila H. 2020. Effect of salicylic acid and salinity stress on the performance of tomato plants. *Gesunde Pflanzen* 72: 393–402. <https://doi.org/10.1007/s10343-020-00521-7>
- Perin EC, da Silva Messias R, Borowski JM, Crizel RL, Schott IB, Carvalho IR, Rombladi CV, Galli V. 2019. ABA-dependent salt and drought stress improve strawberry fruit quality. *Food Chemistry* 271: 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.213>
- Petropoulos SA, Levizou E, Ntatsi G, Fernandes A, Petrotos K, Akoumianakis K, Barros L, Ferreira IC. 2017. Salinity effect on nutritional value, chemical composition and bioactive compounds content of *Cichorium spinosum* L. *Food Chemistry* 214: 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.080>
- Philippi K, Tsamandouras N, Grigorakis S, Makris DP. 2016. Ultrasound-assisted green extraction of eggplant peel (*Solanum melongena*) polyphenols using aqueous mixtures of glycerol and ethanol: optimisation and kinetics. *Environmental Processes* 3: 369–386. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0140-8>
- Rouphael Y, Kyriacou MC, Petropoulos SA, De Pascale S, Colla G. 2018. Improving vegetable quality in controlled environments. *Scientia Horticulturae* 234: 275–289. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.033>
- SAS Institute Inc. 2002. Statistical Analysis System version 9.0. Windows. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.

- Shishira T, Nivedita P, D'souza Myrene R, Singh Kavitha G. 2016. Antioxidant marker response of *Solanum melongena* to salinity stress. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 8 (7): 533–539.
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuela MR. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology* 299: 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Terán-Erazo B, Alia-Tejaca I, Balois-Morales R, Juárez-Lopez P, López-Guzmán GG, Pérez-Arias GA, Núñez-Colín CA. 2019. Caracterización física, química y morfológica de frutos de guanábana (*Annona muricata* L.). *Agrociencia* 53 (7): 1013–1027.
- Valerga L, Darré M, Zaro MJ, Arambarri A, Vicente AR, Lemoine ML, Concellón A. 2019. Microstructural and quality changes in growing dark-purple eggplant (*Solanum melongena* L.) as affected by the harvest season. *Scientia Horticulturae* 244: 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.032>
- Wheeler G, Ishikawa T, Pornsaksit V, Smirnov N. 2015. Evolution of alternative biosynthetic pathways for vitamin C following plastid acquisition in photosynthetic eukaryotes. *Elife* 4: e06369. <https://doi.org/10.7554/eLife.06369>
- WHO (World Health Organization). 2012. Guideline: Sodium intake for adults and children. Geneva, Italy. 46 p.
- Zou Z, Xi W, Hu Y, Nie C, Zhou Z. 2016. Antioxidant activity of *Citrus* fruits. *Food Chemistry* 196: 885–896. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072>

COLORURO DE SODIO EN COMPUESTOS BIOACTIVOS DE BERENJENA (*Solanum melongena* L.) CULTIVADA EN HIDROPONÍA BAJO DOS ESTRUCTURAS PROTEGIDAS

Ana Yesenia Lara-Izaguirre¹, Ángel Natanael Rojas-Velázquez^{1*}, Irán Alia-Tejagal²,
Jorge Alonso Alcalá-Jáuregui¹

¹ Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Carretera San Luis Potosí-Matehuala km 14.5, Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. C. P. 78321.

² Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Avenida Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México. C. P. 62209.

* Corresponding author: angel.rojas@uaslp.mx

RESUMEN

El consumo de frutas y verduras de calidad nutricional aumenta debido a sus altas cantidades de compuestos bioactivos con actividad antioxidante, para prevenir enfermedades y mejorar la salud. La hipótesis es que la salinidad, luz y temperatura en diferentes estructuras protegidas influyen en la composición química y valor nutricional de los frutos de berenjena (*Solanum melongena* L.). El objetivo fue evaluar el efecto de diferentes dosis de cloruro de sodio (NaCl) en la concentración de compuestos bioactivos de frutos de berenjena cultivada en hidroponía bajo invernadero y malla sombra. Las berenjenas se cultivaron en un sistema hidropónico en macetas con tezontle. El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 4 × 2, cuatro dosis de NaCl (0, 15, 30 y 45 mM) y dos estructuras protegidas (invernadero y malla sombra). Las variables evaluadas fueron peso del fruto, firmeza, sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT), sodio, vitamina C, fenoles, flavonoides totales y actividad antioxidante. Los frutos obtenidos de plantas cultivadas en invernadero con 45 mM NaCl disminuyeron 35.9 % el peso respecto a frutos del tratamiento malla sombra con 30 mM NaCl; y aumentaron 51.9 % la firmeza respecto al tratamiento con 15 mM NaCl en malla sombra. La dosis 15 mM NaCl en malla sombra aumentó en 95.8 % los SST en comparación con el tratamiento 30 mM NaCl en invernadero. Bajo malla sombra sin salinidad se tuvo la mayor AT en frutos; asimismo, se observó que la AT de frutos en malla sombra superó en 60.5 % a la AT de frutos de invernadero; independientemente de la dosis de NaCl. La mayor concentración de fruto se tuvo en el tratamiento 45 mM NaCl en invernadero. En malla sombra con dosis de 15 mM NaCl se registró la menor concentración de vitamina C en frutos, siendo inferior en 37 % a la concentración de vitamina C con la misma dosis en invernadero. No se encontraron diferencias significativas en fenoles y flavonoides totales. Los frutos de plantas bajo malla sombra con la dosis 30 mM NaCl tuvieron 165.2 % más capacidad antioxidante que frutos provenientes de plantas bajo malla sombra sin salinidad. Se concluye que las condiciones ambientales de temperatura y radiación en invernadero promovieron un aumento en la concentración de compuestos bioactivos en los frutos de berenjena lo que le proporciona mayor valor nutricional.

Palabras clave: ambiente, antioxidantes, estrés, salud, *Solanum melongena* L.

Citation: Lara-Izaguirre AY, Rojas-Velázquez AN, Alia-Tejagal I, Alcalá-Jáuregui JA. 2022. Sodium chloride on bioactive compounds of eggplant (*Solanum melongena* L.) grown in hydroponics under two protected structures.

Agrociencia
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2732>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: July 07, 2021.
Approved: February 21, 2022.
Estimated publication date:
March 14, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 207-232.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non- Commercial
4.0 International license.



INTRODUCCIÓN

La berenjena (*S. melongena*) es una planta de importancia agronómica, que se cultiva y consume en muchos países (Cericola *et al.*, 2014), contiene compuestos bioactivos considerados como nutraceuticos (Lo Scalzo *et al.*, 2016). Se encuentra entre los 10 principales vegetales en términos de contenido de antioxidantes (Philippi *et al.*, 2016). El consumo de frutas y verduras que contienen estos compuestos, tienen un efecto benéfico en la salud ya que ayuda en la prevención de varias enfermedades en el ser humano (Perin *et al.*, 2019).

La generación de tecnología o de prácticas agronómicas que regulen de forma positiva la síntesis y la acumulación de metabolitos secundarios en plantas es importante para influir en el contenido de antioxidantes en los frutos (Perin *et al.*, 2019). Algunas prácticas que se pueden utilizar son la aplicación de fertilizantes, fecha de siembra, lámina de riego y madurez a la cosecha, además de los factores ambientales, como la humedad del suelo, la temperatura y la radiación solar, que estimulan la concentración de ciertos metabolitos (Zou *et al.*, 2016). Las condiciones de luz dentro de un invernadero cambian según los materiales de cubierta, al filtrar la radiación solar o al reducir la intensidad de la luz, estos materiales están asociados con la calidad vegetal, en las propiedades visuales, organolépticas y composición química (Rouphael *et al.*, 2018). Los cambios ambientales afectan la producción de compuestos fenólicos como un mecanismo de respuesta y adaptación de las plantas (Bacha *et al.*, 2017). En variedades de fresa cultivadas con alta radiación se aumentó el contenido de fenoles totales y flavonoides (Cervantes *et al.*, 2019) y en plantas de tomate cultivadas con alta temperatura aumentó la concentración de vitamina C (Botella *et al.*, 2021).

Por otra parte, la respuesta de las hortalizas de invernadero al estrés salino depende de diferentes factores, entre ellos el material genético, las condiciones climáticas, la etapa fenológica, la duración de la exposición al estrés, la concentración y el tipo de sal (Rouphael *et al.*, 2018). La salinidad por NaCl puede causar efectos positivos en la calidad de frutos, mejora los compuestos bioactivos como la vitamina C y la actividad antioxidante (Petropoulos *et al.*, 2017). Con dosis de 25 y 50 mM NaCl aumenta el contenido de flavonoides en berenjena (Shishira *et al.*, 2016). Dosis de 60 mM NaCl en tomillo (*Thymus vulgaris* L. y *Thymus daenensis* L.) incrementan los fenoles totales (Bistgani *et al.*, 2019); asimismo, la dosis 50 mM NaCl aumenta la actividad antioxidante en flores comestibles de *Tagetes patula* L. (Chrysargyris *et al.*, 2018).

De acuerdo con lo anterior, las condiciones ambientales y la salinidad afectan la calidad de los cultivos, la composición química y el valor nutricional. Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes dosis de cloruro de sodio (NaCl) en la concentración de compuestos bioactivos de frutos de berenjena cultivada en hidroponía en invernadero y bajo malla sombra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y condiciones de crecimiento

El experimento se realizó en el ciclo verano otoño (junio-diciembre) de 2019, en el área de hidroponía de la Facultad de Agronomía y Veterinaria, en San Luis Potosí, México.

Las estructuras utilizadas fueron un invernadero tipo túnel de dimensiones 5.5 x 18 m con cubierta plástica color blanco y una malla sombra tipo capilla con las mismas dimensiones con cubierta de malla color negro. En el invernadero la temperatura media fue de 23 °C con una intensidad luminosa media de 325.74 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; bajo malla sombra la temperatura media fue de 17 °C con una intensidad luminosa media de 183.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Lo cual fue medido con un registrador HOBO (Onset UA-002-08 Pendant Temperature/Light Data Logger) en cada estructura.

La berenjena 'Black Beauty' (Caloro®) se utilizó como material vegetal con un porcentaje de germinación del 85 %, el cual se sembró en charolas de poliestireno con 220 cavidades, con un sustrato comercial con base de turba ácida BM2 Berger®. A los 60 d después de la siembra, se trasplantaron a macetas de plástico negro de 10 L, con tezontle rojo como sustrato con una granulometría de 5 a 6 mm. Plántulas con 12 cm de altura y cuatro hojas verdaderas se utilizaron para el trasplante, con 80 plántulas en cada estructura protegida con un total de 160 plantas, bajo un sistema de riego por goteo.

El riego del cultivo se realizó con la solución universal de Steiner ($\text{mol}_c \text{m}^{-3}$): 12 NO_3^- , 7 SO_4^{2-} , 1 H_2PO_4^- , 9 Ca^{+2} , 7 K^+ y 4 Mg^{+2} . Los fertilizantes utilizados fueron $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 y H_3PO_4 . Los micronutrientes se añadieron a partir de Carboxy[®] Micro, el cual aportó en mg L^{-1} : Fe 0.5, Zn 0.25, Mn 0.1, Mg 0.05 y B 0.05 en forma quelatada EDDHA. El pH de la solución se ajustó con H_3PO_4 a 5.5.

A los 54 d después del trasplante (inicio de la floración) se aplicaron los tratamientos en las dos estructuras, se añadió NaCl (J. T. BakerTM, EUA) a la solución Steiner en cuatro dosis: 0 (como testigo), 15, 30 y 45 mM.

Diseño de tratamientos y diseño experimental

El experimento se realizó en un diseño completamente al azar. Los tratamientos tuvieron un arreglo factorial 4 x 2, en donde las cuatro dosis de NaCl fueron 0, 15, 30 y 45 mM y dos estructuras protegidas, invernadero y malla sombra. La unidad experimental fue una planta y se establecieron 20 repeticiones por tratamiento.

Determinación de peso a la cosecha, firmeza y concentración de sodio en frutos

Los frutos maduros se cosecharon cuando adquirieron una coloración negro brillante, esto fue a partir de los 105 d después de la aplicación de los tratamientos y se pesaron en una balanza digital (Ohaus[®] PAJ4102N Gold series, EUA), el peso se reportó en gramos. La firmeza se midió con un penetrómetro (QA Supplies, EUA) con punta de émbolo de 11 mm. Para la concentración de sodio en los frutos, se cortó una porción del fruto de dos gramos, se molió en un mortero y se agregaron cuatro gotas al ionómetro para las lecturas (Na^+ Laqua Twin Compact Ion Meter, Horiba, Kyoto, Japón).

Determinaciones de compuestos bioactivos de los frutos

Para la evaluación de la concentración de compuestos bioactivos y organolépticos, se tomaron cuatro muestras por tratamiento de frutos maduros a los 100 d después de la aplicación de los tratamientos, se lavaron con agua destilada y se metieron a secar en

una estufa de secado de aire forzado (Omron, Kyoto, Japón) a 70 °C hasta obtener peso constante. Los frutos secos se molieron (molino Krups, México) hasta obtener polvo, el cual se utilizó para el análisis.

Sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable (AT)

Los extractos se prepararon con 0.1 g de muestra seca en 12 mL de agua destilada, en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX®, IKA, EUA) y se filtraron para determinar sólidos solubles totales y acidez titulable.

Los SST se determinaron en dos gotas del filtrado las cuales se colocaron en un refractómetro digital de bolsillo (PAL-1, Atago®, Japón) los resultados se reportaron en °Brix. La AT se determinó de acuerdo con la metodología descrita por AOAC (1990), usando fenolftaleína como indicador y los resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico.

Vitamina C

Para el análisis de vitamina C, se homogenizó 0.1 g de muestra seca de fruto en 11 mL de agua destilada en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX®, IKA, EUA) y se filtró. El ácido ascórbico se determinó de acuerdo con el método espectrofotométrico descrito por da Silva *et al.* (2017) con algunas modificaciones. Brevemente, en un vaso de precipitado se agregó 1 mL de muestra homogenizada y filtrada, se le añadió 1 mL de una solución acetato-urea 1.5 % (p/v), 3 mL de una solución acetato cúprico-cuproína 0.075 % (p/v) y 5 mL de etanol absoluto. La absorbancia se midió a 545 nm. La cuantificación se realizó con una curva de calibración de ácido ascórbico y los resultados se reportan en concentración de ácido ascórbico (AA) en mg mL⁻¹.

Fenoles

Los fenoles totales se determinaron con el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu (Singleton *et al.*, 1999), con algunas modificaciones. Para el extracto se homogenizó 0.1 g de muestra seca de fruto en 11 mL de agua destilada en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX®, IKA) y se filtró. Se colocaron 200 µL de la muestra con 300 µL de agua destilada en tubos de ensayo, además 2.5 mL de Folin- Ciocalteu y 2 mL de NaCO₃. Las muestras se dejaron reposar en cámara oscura por 2 h y se midió la absorbancia a 760 nm. La curva estándar se realizó con ácido gálico y los resultados se expresan en mg equivalentes de ácido gálico (EAG) g⁻¹ de peso seco.

Flavonoides

La concentración de flavonoides totales se determinó de acuerdo con el método de AlCl₃ modificado (Arvouet-Grand *et al.*, 1994). Para el extracto, se utilizaron 0.2 g de muestra seca en 12 mL de metanol absoluto en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX®, IKA, EUA) y se filtró. De esta muestra se tomaron 2.5 mL y se adicionaron 2 mL de AlCl₃ y se incubaron en cámara de oscuridad por 10 min. La absorbancia de las muestras se midió a 415 nm en un espectrofotómetro UV-Vis

(GENESYS 10S, Thermo Scientific™, USA). Se realizó una curva estándar de quercetina y los resultados se expresaron en mg equivalentes de quercetina (EQ) g⁻¹ de peso seco.

Actividad antioxidante

La actividad antioxidante se determinó por medio del método ABTS descrito por Terán-Erazo *et al.* (2019).

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas comparación de medias por Tukey ($p \leq 0.05$), usando el programa estadístico SAS versión 9.0 (SAS Institute Inc., 2002). Además, se realizó un análisis de correlación (coeficientes de correlación de Pearson) y un análisis de componentes principales con el programa estadístico Minitab versión 16 (Minitab Institute Inc., 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peso de frutos

El peso de frutos de berenjena fue influenciado por las condiciones climáticas en las estructuras utilizadas, la interacción de los factores de estudio ocasionó diferencias significativas (Cuadro 1). Los frutos obtenidos de plantas de berenjena cultivadas en invernadero y con 45 mM NaCl tuvieron 35.9 % menos peso que los frutos del tratamiento 30 mM NaCl con malla sombra (Cuadro 1). En este estudio, el peso de frutos fue más afectado por el NaCl cuando se tuvo una temperatura de 23 °C en el invernadero. En berenjena se ha reportado que, la temperatura media del aire entre 22 y 19 °C en invernadero aumenta el peso de los frutos comparado con los cultivados en

Cuadro 1. Calidad de frutos de berenjena cultivados bajo dos tipos de estructuras protegidas y diferentes dosis de NaCl.

Factor Nivel	Peso de frutos (g)	Firmeza (kg)	Sólidos solubles totales (°Brix)	Acidez titulable (%)
Interaction (EP × NaCl)				
I [†] , 0	428.43 ab	7.67 abc	8.40 bc	3.57 c
I, 15	453.73 ab	7.50 abc	7.50 bc	2.91 c
I, 30	431.30 ab	8.30 ab	7.20 c	2.83 c
I, 45	346.00 b	9.22 a	9.30 abc	3.36 c
MS [‡] , 0	414.38 ab	7.70 abc	12.60 ab	6.48 a
MS, 15	500.20 a	6.07 c	14.10 a	6.16 ab
MS, 30	539.85 a	6.85 bc	9.30 abc	3.97 bc
MS, 45	463.70 ab	6.17 c	9.00 abc	3.73 c
DMSH [§]	147.22	2.02	5.28	22.21
CV [¶]	14.05	11.63	23.34	22.92

Medias con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). [†]I: invernadero; [‡]MS: malla sombra; [§]DMSH: diferencia mínima significativa; [¶]CV: coeficiente de variación.

temperaturas de 11 °C (Valerga *et al.*, 2019). En tomate cultivado a 25 °C, la aplicación de 60 mM NaCl disminuyó el peso de los frutos en 35 %; con temperatura de 35 °C lo disminuyó en 58 % respecto al testigo cultivado con 1 mM NaCl a 25 °C (Botella *et al.*, 2021). Por otro lado, la salinidad ocasionada con el suministro de 30, 60 y 90 mM NaCl disminuyó el rendimiento en genotipos mexicano nativos de tomate, siendo los mayores decrementos registrados en Campeche, del orden de 71.1, 80.1 y 89.6 %, respectivamente, en todos los casos respecto al testigo sin salinidad (Ladewig *et al.*, 2021).

Firmeza

Los frutos cultivados en invernadero y con dosis de 45 mM NaCl tuvieron 51.9 % mayor firmeza comparado con 15 mM NaCl en malla sombra, este efecto puede ser atribuido al aumento de luz y la temperatura (Cuadro 1). Por el contrario, Valerga *et al.* (2019) mencionaron que la firmeza en frutos de berenjena cultivados en invernadero muestra cambios disímiles según las condiciones de cosecha; a temperaturas de 22 °C disminuyó 38 % respecto a temperaturas de 11 °C. En plantas de tomate cultivadas a 35 °C con 60 mM NaCl disminuyó la firmeza del fruto en 22 % respecto a los frutos cultivados a 25 °C (Botella *et al.*, 2021). En frutos de tomate con dosis de 30 mM NaCl no se afectó la firmeza, en cambio, con dosis de 60 y 90 mM ésta aumentó en 10 % (Naeem *et al.*, 2020). Garriga *et al.* (2015) mencionaron que los efectos de toxicidad de los iones Na^+ y Cl^- , aumentan la actividad de las pectinasas y otras enzimas que degradan pared celular por lo que la firmeza se disminuye.

Sólidos solubles totales

La dosis de 15 mM NaCl en combinación con malla sombra aumentó en 95.8 % los SST en los frutos en comparación con las dosis 30 mM NaCl en invernadero (Cuadro 1). Ilić y Fallik (2017) reportan que bajo mallas negras la transmisión de luz azul es más alta y por tanto, la planta tiene mayor producción de fotosintatos, lo que aumenta los sólidos solubles en los frutos. También las dosis altas de NaCl promueven mayor contenido de SST; en plantas de tomate cultivadas con 60 mM NaCl a 25 y 35 °C, los sólidos solubles totales aumentaron en 15 y 10 %, respecto al testigo con 1 mM NaCl (Botella *et al.*, 2021). En genotipos nativos de tomate, las dosis 30, 60 y 90 mM NaCl provocaron aumentos desde 25 % en los sólidos solubles totales (Ladewig *et al.*, 2021). También en tomate, la adición de 50 y 100 mM NaCl a la solución nutritiva incrementó los sólidos solubles totales en 80 %, en comparación con el testigo (Carbajal-Vázquez *et al.*, 2020). En el cultivo de berenjena, al aplicar 40 mM NaCl los azúcares como sacarosa, glucosa y fructosa se acumularon en respuesta al estrés salino, ya que funcionan como osmolitos para mantener la turgencia celular y proteger las membranas y proteínas (Hannachi *et al.*, 2018).

Acidez titulable

La mayor AT de frutos se tuvo en plantas cultivadas en malla sombra y sin salinidad, que superó en 128.9 % al valor de frutos de plantas tratadas con 30 mM NaCl

en invernadero. Asimismo; el tratamiento sin salinidad bajo malla sombra, ocasionó un incremento de 104.5 % en promedio en la AT de frutos respecto al valor de frutos obtenidos en invernadero con todos los niveles de NaCl (0, 15, 30 y 45 mM; Cuadro 1). El estrés salino causado por la adición de 50 y 100 mM NaCl a la solución nutritiva, aumentó la acidez titulable en 63.6 y 65.9 % en frutos de tomate, con respecto al testigo (Carbajal-Vázquez *et al.*, 2020). Asimismo, en frutos de tomate de plantas tratadas con 60 mM NaCl a 25 °C aumentó la acidez en 26 %; mientras que, a 35 °C no se tuvo efecto de NaCl (Botella *et al.*, 2021). En tomate, la acidez aumentó en 39 % con 50 mM NaCl, lo cual se atribuyó al incremento en el contenido de ácidos orgánicos que participan en el mecanismo de osmorregulación de las plantas en condiciones de alta salinidad (Costan *et al.*, 2020). Por el contrario, en frutos de pimiento la aplicación de 20.1 mM NaCl no tuvo efecto en la acidez titulable (Giuffrida *et al.*, 2014).

Sodio en frutos

Los frutos de plantas cultivadas en invernadero con dosis de 45 mM NaCl mostraron mayor concentración de sodio, superando en promedio en 60 % a los frutos de plantas tratadas con 30 y 45 mM NaCl en malla sombra (Figura 1). En plantas de berenjena 'Black Beauty' el estrés por NaCl provocó una respuesta osmorreguladora al acumular Na^+ y Cl^- y disminuir K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} y NO_3^- (Hannachi *et al.*, 2018). La OMS recomienda la ingesta de 2 g Na^+ día⁻¹ en adultos (WHO, 2012). En este caso, al suponer un consumo *per cápita* anual de berenjena de 700 g en México, la concentración de sodio obtenida en este estudio con dosis de 30 y 45 mM NaCl en frutos cultivados en invernadero, representa sólo el 11 % de la ingesta diaria recomendada, por lo que el consumo de frutos de berenjena con dosis de NaCl no representa riesgo alguno para la salud.

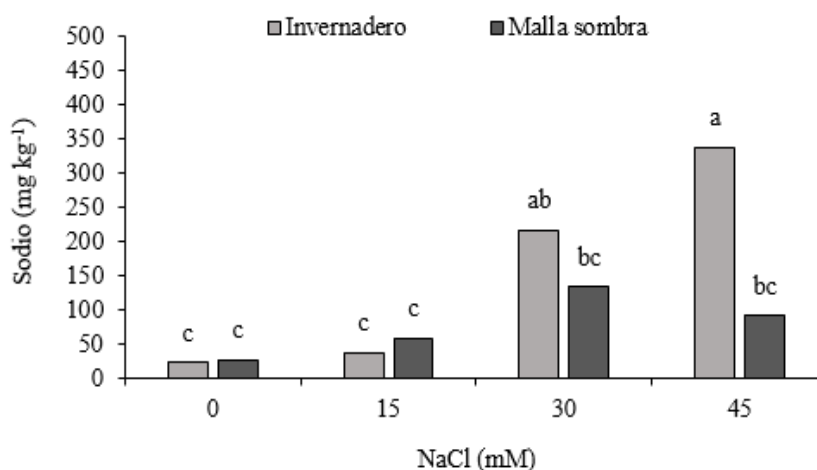


Figura 1. Concentración de sodio en frutos de berenjena de plantas en respuesta a la interacción estructura protegida y dosis de NaCl. Medias con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Flavonoides

El tipo de estructura donde se cultivó la berenjena, la aplicación de dosis de NaCl y la interacción de los factores en estudio no afectaron significativamente la concentración de flavonoides en los frutos (Cuadro 2). Contrario a lo aquí observado, Cervantes *et al.* (2019) observaron que el contenido de flavonoides incrementó 29 % en frutos de fresa 'Fortuna' expuestas a intensidad luminosa de 1100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en macrotúnel, respecto a 440 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Brenes *et al.* (2020) en plantas de berenjena con dosis de 50, 100, 200 y 300 mM NaCl no encontraron efectos en flavonoides totales. En contraste, Shishira *et al.* (2016) indicaron que en berenjena bajo estrés salino la cantidad de flavonoides totales aumentó con dosis de 25 y 50 mM NaCl en 26 y 64 % respecto al testigo sin salinidad.

Fenoles

Los frutos cosechados de plantas cultivadas en invernadero mostraron incrementos de 18.1 % en la concentración de fenoles que los frutos de plantas cultivadas en malla

Cuadro 2. Concentración de flavonoides y fenoles totales en frutos de berenjena cultivados bajo dos tipos de estructuras protegidas y diferentes dosis de NaCl.

Factor Nivel	Flavonoides totales (mg EQ g ⁻¹)	Fenoles totales (mg EAG g ⁻¹)
Estructura protegida (EP)		
I	73.92 a	507.93 a
M	74.79 a	429.81 b
DMSH	11.36	77.44
NaCl (mM)		
0	74.35 a	519.64 a
15	71.33 a	514.91 a
30	72.82 a	381.13 a
45	78.92 a	459.80 a
DMSH	21.65	147.56
Interacción (EP × NaCl)		
I [†] , 0	71.65 a	517.09 a
I, 15	66.93 a	543.31 a
I, 30	74.64 a	467.56 a
I, 45	82.60 a	503.74 a
MS [‡] , 0	77.07 a	522.19 a
MS, 15	75.74 a	486.50 a
MS, 30	71.02 a	294.70 a
MS, 45	75.34 a	415.85 a
DMSH [§]	37.00	252.18
CV [‡]	20.48	22.14

Medias con letras distintas en cada columna y factor de estudio son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). [†]I: invernadero; [‡]MS: malla sombra; [§]DMSH: diferencia mínima significativa; [‡]CV: coeficiente de variación.

sombra (Cuadro 2). La intensidad de luz en malla sombra fue de $183 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y en invernadero de $326 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, lo que aumentó la concentración fenólica total. Con las dosis de NaCl aplicadas no se detectaron diferencias significativas en fenoles en frutos (Cuadro 2), las concentraciones oscilaron entre 400 y $580 \text{ mg EAG } 100 \text{ g}^{-1}$. Brenes *et al.* (2020) encontraron que dosis de 50, 100, 200 y 300 mM NaCl no afectaron el contenido fenólico total en plantas de berenjena. En la interacción de los dos factores en estudio no se encontraron diferencias significativas en fenoles en los frutos (Cuadro 2). Bacha *et al.* (2017) mencionaron que la producción y acumulación de compuestos fenólicos es un mecanismo de respuesta y adaptación de las plantas expuestas a condiciones estresantes.

Vitamina C

La interacción de los dos factores en estudio tuvo efectos significativos en la concentración de vitamina C en frutos (Figura 2A). En los frutos de plantas cultivadas con dosis 0, 15 y 45 mM NaCl en invernadero y sin salinidad en malla sombra tuvieron en

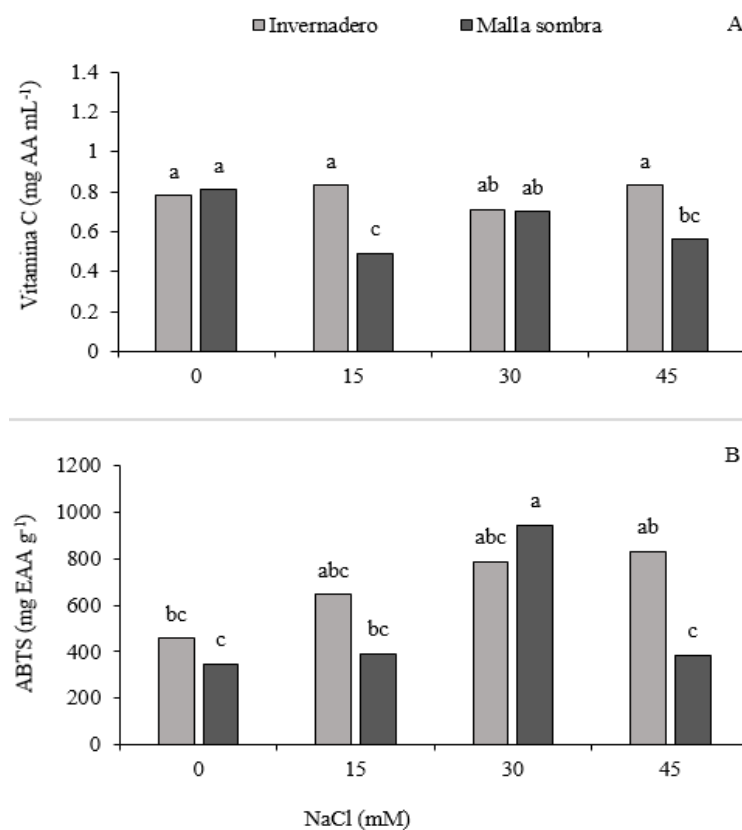


Figura 2. Concentración de vitamina C y actividad antioxidante ABTS en frutos de berenjena de plantas cultivadas en respuesta a la estructura protegida y dosis de NaCl. Medias con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

promedio 33 % y 41 % mayor concentración de vitamina C que los frutos de plantas tratadas con 45 mM NaCl y 15 mM NaCl en malla sombra, respectivamente. La dosis 50 mM NaCl no provocó diferencias en el contenido de vitamina C en frutos de tomate (Costan *et al.*, 2020) y con la aplicación de 30 a 90 mM NaCl aumentó de 11 a 25 % (Naeem *et al.*, 2020). En plantas de tomate la concentración de vitamina C aumentó en 16 y 26 % con dosis de 1 y 60 mM NaCl con la temperatura alta 35 °C, respecto a 25 °C, lo que indica el efecto del estrés por calor y ningún efecto de la salinidad (Botella *et al.*, 2021). Fenech *et al.* (2019) mencionaron que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es responsable del daño oxidativo inducido por la luz. En condiciones de alta irradiancia durante la fotosíntesis, el ascorbato está involucrado en la eliminación del exceso de H_2O_2 (Wheeler *et al.*, 2015). En este estudio, el incremento en la concentración de vitamina C pudo deberse a la intensidad luminosa en el invernadero que fue de 325.74 $\mu\text{mol m}^{-2}$, mayor a la registrada bajo malla sombra (183.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Actividad antioxidante

La interacción de los factores en estudio tuvo efecto significativo en la actividad antioxidante (Figura 2B). Los frutos de plantas bajo malla sombra con la dosis 30 mM NaCl aumentaron 165.2 % la capacidad antioxidante en comparación con frutos de plantas producidas en malla sombra sin salinidad. De acuerdo con Khanahmadi *et al.* (2010) de que ante la inducción de un estrés salino las plantas incrementan las sustancias antioxidantes para su defensa ante el estrés oxidativo. En el invernadero se tuvo una intensidad de luz de 326 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y bajo malla sombra 183 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, lo que sugiere el aumento en la actividad antioxidante. Las plantas acumulan una serie de compuestos fenólicos y antioxidantes como medida protectora contra la luz intensa y los rayos UV (Ilić y Fallik, 2017). La actividad antioxidante aumentó en flores comestibles de *Tagetes patula* L. en 11 % con la dosis 50 mM NaCl (Chrysargyris *et al.*, 2018).

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales se realizó con el conjunto de datos originales de compuestos bioactivos en frutos. Los primeros tres componentes explicaron el 88.6 % de la variabilidad en los datos (37.7, 27.4, 23.5 %) obtenidos de los seis compuestos bioactivos analizados. Se realizó la gráfica de dispersión con el PC1 y PC2, lo que explica en conjunto el 65.1 % de la variabilidad de los datos originales (Figuras 3A-B). En el PC1 las correlaciones positivas con valores más altos fueron la actividad antioxidante ABTS (0.59) y vitamina C (0.70). La actividad antioxidante aumenta al inducir estrés a las plantas (Chrysargyris *et al.*, 2018), además, el ácido ascórbico actúa de manera eficaz en respuesta al estrés oxidativo, depende de la necesidad generada por el entorno de la planta y la situación fisiológica (Shishira *et al.*, 2016). En el PC2, las correlaciones positivas con valores más altos fueron fenoles (0.58) y flavonoides (0.75). La influencia de la estructura protegida de invernadero, así como de las dosis de NaCl muestra datos que tienen un efecto en esta variabilidad. Además, se distinguió un grupo de datos distantes del eje relacionado con la dosis 30 mM NaCl.

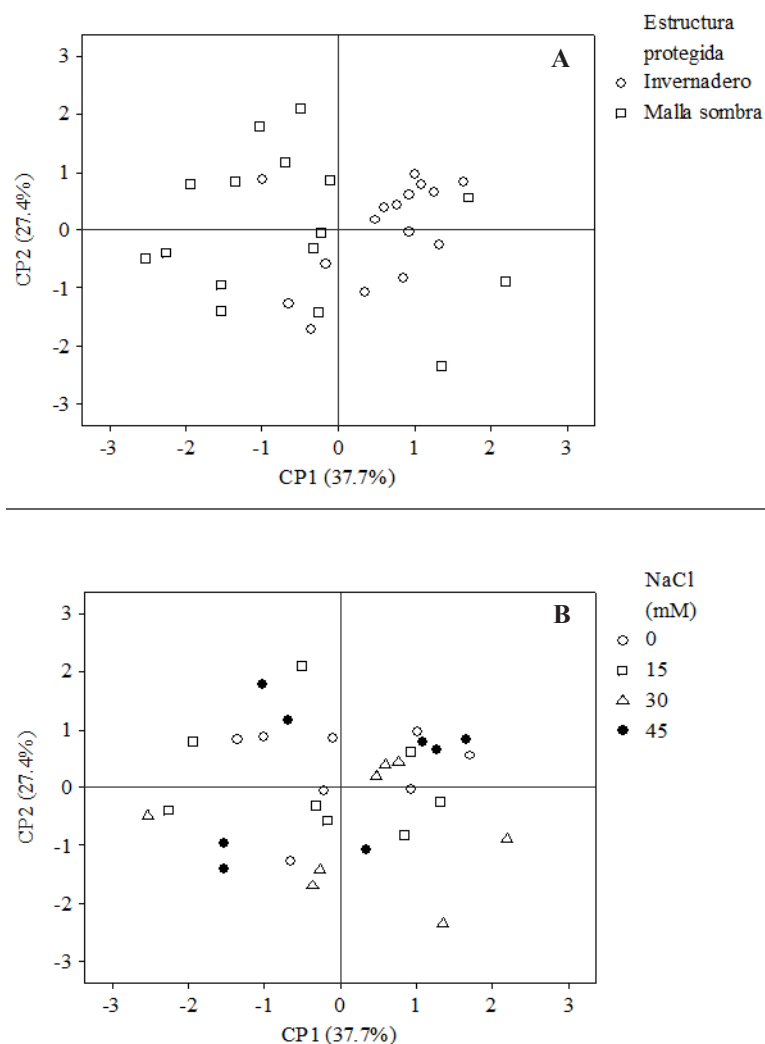


Figura 3. Distribución de puntos derivado del análisis de componentes principales de compuestos bioactivos de berenjena en dos estructuras protegidas y dosis de NaCl.

CONCLUSIONES

Este estudio mostró que la producción de berenjena en invernadero con dosis de 30 y 45 mM NaCl incrementó la concentración de vitamina C y la actividad antioxidante en frutos. En malla sombra, la dosis de 30 mM NaCl incrementó la actividad antioxidante. Se concluye que las condiciones ambientales de temperatura y radiación en invernadero promovieron un aumento en la concentración de compuestos bioactivos en los frutos de berenjena lo que le proporciona mayor valor nutricional.

REFERENCIAS

- AOAC. 1990. Official Methods and Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Helrich, K. (ed.). Arlington, Virginia USA. 1298 p.
- Arvouet-Grand A, Vennat B, Pourrat A, Legret P. 1994. Standardisation dun extrait de propolis et identification des principaux constituents. *Journal Pharmacie de Belgique* 49 (6): 462–468.
- Bacha H, Tekaya M, Drine S, Guasmi F, Touil L, Enneb H, Triki T, Cheour F, Ferchichi A. 2017. Impact of salt stress on morpho-physiological and biochemical parameters of *Solanum lycopersicum* cv. Microtom leaves. *South African Journal of Botany* 108: 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.08.018>
- Bistgani ZE, Hashemi M, DaCosta M, Craker L, Maggi F, Morshedloo MR. 2019. Effect of salinity stress on the physiological characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of *Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* Celak. *Industrial Crops and Products* 135 (1): 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.055>
- Botella MÁ, Hernández V, Mestre T, Hellín P, García-Legaz MF, Rivero RM, Martínez V, Fenoll J, Flores P. 2021. Bioactive compounds of tomato fruit in response to salinity, heat and their combination. *Agriculture* 11 (6): 534. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060534>
- Brenes M, Solana A, Boscaiu M, Fita A, Vicente O, Calatayud A, Prohens J, Plazas M. 2020. Physiological and biochemical responses to salt stress in cultivated eggplant (*Solanum melongena* L.) and in *S. insanum* L., a close wild relative. *Agronomy* 10 (5): 651. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050651>
- Carbajal-Vazquez VH, Gomez-Merino FC, Herrera-Corredor JA, Contreras-Oliva A, Alcantar-Gonzalez G, Trejo-Téllez LI. 2020. Effect of titanium foliar applications on tomato fruits from plants grown under salt stress conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 48 (2): 924–937. <https://doi.org/10.15835/nbha48211904>
- Cericola F, Portis E, Lanteri S, Toppino L, Barchi L, Acciarri N, Pulcini L, Sala T, Rotino GL. 2014. Linkage disequilibrium and genome-wide association analysis for anthocyanin pigmentation and fruit color in eggplant. *BMC Genomics* 15: 896. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-896>
- Cervantes L, Ariza MT, Gomez-Mora JA, Miranda L, Medina JJ, Soria C, Martínez-Ferri E. 2019. Light exposure affects fruit quality in different strawberry cultivars under field conditions. *Scientia Horticulturae* 252 (4): 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.058>
- Chrysargyris A, Tzionis A, Xylia P, Tzortzakis N. 2018. Effects of salinity on tagetes growth, physiology, and shelf life of edible flowers stored in passive modified atmosphere packaging or treated with ethanol. *Frontiers in Plant Science* 9: 1765. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01765>
- Costan A, Stamatakis A, Chrysargyris A, Petropoulos SA, Tzortzakis N. 2020. Interactive effects of salinity and silicon application on *Solanum lycopersicum* growth, physiology and shelf-life of fruit produced hydroponically. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100 (2): 732–743. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10076>
- da Silva TL, Aguiar-Oliveira E, Mazalli MR, Kamimura ES, Maldonado RR. 2017. Comparison between titrimetric and spectrophotometric methods for quantification of vitamin C. *Food Chemistry* 224: 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.052>
- Fenech M, Amaya I, Valpuesta V, Botella M.A. 2019. Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation. *Frontiers in Plant Science* 9: 2006. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.02006>
- Garriga M, Muñoz CA, Caligari PD, Retamales JB. 2015. Effect of salt stress on genotypes of commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*). *Scientia Horticulturae* 195: 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.036>
- Giuffrida F, Graziani G, Fogliano V, Scuderi D, Romano D, Leonardi C. 2014. Effects of nutrient and NaCl salinity on growth, yield, quality and composition of pepper grown in soilless closed system. *Journal of Plant Nutrition* 37: 1455–1474. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.881874>
- Hannachi S, Van Labeke MC. 2018. Salt stress affects germination, seedling growth and physiological responses differentially in eggplant cultivars (*Solanum melongena* L.). *Scientia Horticulturae* 228: 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.002>
- Ilić ZS, Fallik E. 2017. Light quality manipulation improves vegetable quality at harvest and postharvest: A review. *Environmental and Experimental Botany* 139: 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.006>
- Khanahmadi M, Rezazadeh SH, Taran M. 2010. *In vitro* antimicrobial and antioxidant properties of *Smyrniium cordifolium* Boiss. (Umbelliferae) extract. *Asian Journal of Plant Sciences* 9 (2): 99–103. <https://doi.org/10.3923/ajps.2010.99.103>

- Ladewig P, Trejo-Téllez LI, Servín-Juárez R, Contreras-Oliva A, Gomez-Merino FC. 2021. Growth, yield and fruit quality of Mexican tomato landraces in response to salt stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 49 (1): 12005–12005. <https://doi.org/10.15835/nbha49112005>
- Lo Scalzo RL, Fibiani M, Francese G, D'Alessandro A, Rotino GL, Conte P, Mennella G. 2016. Cooking influence on physico-chemical fruit characteristics of eggplant (*Solanum melongena* L.). *Food Chemistry* 194: 835–842. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.063>
- Minitab Inc. 2010. Statistical Software; Minitab version 16: State College, PA, USA.
- Naeem M, Basit A, Ahmad I, Mohamed HI, Wasila H. 2020. Effect of salicylic acid and salinity stress on the performance of tomato plants. *Gesunde Pflanzen* 72: 393–402. <https://doi.org/10.1007/s10343-020-00521-7>
- Perin EC, da Silva Messias R, Borowski JM, Crizel RL, Schott IB, Carvalho IR, Rombladi CV, Galli V. 2019. ABA-dependent salt and drought stress improve strawberry fruit quality. *Food Chemistry* 271: 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.213>
- Petropoulos SA, Levizou E, Ntatsi G, Fernandes A, Petrotos K, Akoumianakis K, Barros L, Ferreira IC. 2017. Salinity effect on nutritional value, chemical composition and bioactive compounds content of *Cichorium spinosum* L. *Food Chemistry* 214: 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.080>
- Philippi K, Tsamandouras N, Grigorakis S, Makris DP. 2016. Ultrasound-assisted green extraction of eggplant peel (*Solanum melongena*) polyphenols using aqueous mixtures of glycerol and ethanol: optimisation and kinetics. *Environmental Processes* 3: 369–386. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0140-8>
- Rouphael Y, Kyriacou MC, Petropoulos SA, De Pascale S, Colla G. 2018. Improving vegetable quality in controlled environments. *Scientia Horticulturae* 234: 275–289. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.033>
- SAS Institute Inc. 2002. Statistical Analysis System version 9.0. Windows. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.
- Shishira T, Nivedita P, D'souza Myrene R, Singh Kavitha G. 2016. Antioxidant marker response of *Solanum melongena* to salinity stress. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 8 (7): 533–539.
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuela MR. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology* 299: 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Terán-Erazo B, Alia-Tejacal I, Balois-Morales R, Juárez-Lopez P, López-Guzmán GG, Pérez-Arias GA, Núñez-Colín CA. 2019. Caracterización física, química y morfológica de frutos de guanábana (*Annona muricata* L.). *Agrociencia* 53 (7): 1013–1027.
- Valerga L, Darré M, Zaro MJ, Arambarri A, Vicente AR, Lemoine ML, Concellón A. 2019. Micro-structural and quality changes in growing dark-purple eggplant (*Solanum melongena* L.) as affected by the harvest season. *Scientia Horticulturae* 244: 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.032>
- Wheeler G, Ishikawa T, Pornsaksit V, Smirnov N. 2015. Evolution of alternative biosynthetic pathways for vitamin C following plastid acquisition in photosynthetic eukaryotes. *Elife* 4: e06369. <https://doi.org/10.7554/eLife.06369>
- WHO (World Health Organization). 2012. Guideline: Sodium intake for adults and children. Geneva, Italy. 46 p.
- Zou Z, Xi W, Hu Y, Nie C, Zhou Z. 2016. Antioxidant activity of *Citrus* fruits. *Food Chemistry* 196: 885–896. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072>



PREDICTION OF SOCIAL LAG IN MEXICO: A MACHINE LEARNING APPROACH FROM ECONOMIC UNIT DATA

Pablo Rodrigo Ávila-Solís¹, Juan Manuel González-Camacho^{1*},
Delfino Vargas-Chanes², Paulino Pérez-Rodríguez¹

¹ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática-Cómputo Aplicado. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56230.

² Universidad Nacional Autónoma de México. Programa Universitario de Estudios del Desarrollo. Avenida Universidad, 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Mexico City, Mexico. C. P. 04510.

* Corresponding author: jmgc@colpos.mx

ABSTRACT

Social lag in Mexico is officially calculated at the municipal level every five years, based on data from the population and housing census, by the National Council for the Evaluation of Social Development Policy (Consejo Nacional para la Evaluación de la Política de Desarrollo Social, CONEVAL). However, it is advisable to have annual forecasts of social lag for the follow-up of public policies. This study presents a machine learning approach to predict the classes or degrees of social lag (high, medium, low) at the municipal level in Mexico, based on information on economic units from the 2015 National Statistical Directory of Economic Units (Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, DENUE). Three supervised machine learning classifiers were implemented: logistic regression, support vector machine and random forests; and they were trained and tested in prediction based on information from counts of economic units, in their different categories, population and geographic coordinates of the municipalities; likewise, objective social lag classes were used at the municipal level, calculated with 2015 census information, reported in the literature. The criteria for evaluating the performance of the classifiers were the F-macro value, the overall accuracy and the area under the curve (ROC). The results indicate that the best overall performance was obtained with the random forest classifier with an F-macro value of 0.713 and an overall classification accuracy of 0.716; and F1-macro values for the high, medium, and low social lag classes of 0.596, 0.730, and 0.822, respectively. This classifier was used to predict social lag for 2016 and 2017. The results showed that there is a relationship between social lag and economic units aggregated at the subsector level, and that the proposed approach represents a viable and low-cost alternative for predicting social lag when census information is lacking.

Keywords: decision trees, poverty, classification models, logistic regression, artificial intelligence.

Citation: Rodrigo Ávila-Solís P, González-Camacho JM, Vargas-Chanes D, Pérez-Rodríguez P. 2022. Prediction of social lag in Mexico: a machine learning approach from economic unit data. *Agrociencia* <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2768>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: September 01, 2021.
Approved: March 08, 2022.
Estimated publication date:
April 18, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 233-263.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCTION

According to the General Law of Social Development in force in 2004, federal resources and support in Mexico are distributed at the municipal level and are allocated according to the degree of social lag. It is therefore important to periodically monitor this variable in order to identify areas of high lag. Social lag, unlike poverty, is a socioeconomic indicator of social deprivation. The Mexico's National Council for the Evaluation of Social Development Politics (Consejo Nacional para la Evaluación de la Política de Desarrollo Social; CONEVAL, 2016) reported the grouping of social lag into five classes: very low, low, medium, high and very high, based on a principal component analysis, the stratification technique proposed by Dalenius and Hodges (1959) and information from the 2015 intercensal survey. This survey includes 11 sociodemographic variables related to education, health, basic services, household assets and housing quality.

The estimation of social lag is carried out every five years in an official manner, due to the availability of socioeconomic variables. Vargas-Chanes and Valdés-Cruz (2019) proposed an alternative method to estimate social lag at the municipal level, they defined three classes (low, medium and high) based on a latent class analysis and data from the 2015 intercensal survey reported by CONEVAL (2016), to give greater statistical support to the estimation of social lag at the municipal level.

Indirect methods for estimating poverty-related socioeconomic indicators are reported in the literature. Engstrom *et al.* (2017) conducted a proposal with a multiple regression model with L1 penalty to estimate the average poverty and consumption rates of 1291 municipalities in Sri Lanka from satellite imagery. These authors found that the features obtained from the images explain about 60 % of the variation in the data studied. Alsharkawi *et al.* (2021) applied 16 supervised learning models, based on different national household surveys, to classify the poverty status of households in Jordan. These include logistic regression, gradient boosting, random forests and support vector machine. These authors reported that the gradient boosting classifier obtained 81 % performance with the F1 metric with an unbalanced data set. Sani *et al.* (2018) used three classifiers to categorize monthly household income for three states in Malaysia: k-nearest neighbors, decision trees and empirical Bayesian. The decision tree classifier was the most significant in detecting whether households were in the poorest 40 % or outside the poorest 40 %, with unbalanced classes.

Powell *et al.* (2007) studied the availability of economic units in the United States such as grocery stores aggregated by zip code. These authors applied multivariate regression analysis to associate neighborhood location characteristics from 2000 census data, and indicated that supermarkets and grocery stores are located in low-income neighborhoods. This shows the possibility of calculating socioeconomic indicators of a geographic region from economic units.

The objective of this study was to implement three machine learning models: logistic regression, support vector machine and random forests to predict the social lag classes (low, medium and high) at the municipal level from 2015 data of economic units,

population and geographic coordinates of the municipalities; to train and evaluate in prediction with the 2015 target social lag classes reported by Vargas-Chanes and Valdés-Cruz (2019); and to perform based on the proposed approach predictions of the degrees of social lag at the municipal level for the years 2016 and 2017.

MATERIALS AND METHODS

Data collection

To conduct the study, data on economic units (UE), approximately five million records, were obtained from the fifth edition of the National Statistical Directory of Economic Units (Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, DENUE) (INEGI, 2015). INEGI has been conducting the DENUE since 2010 and as of 2015 it has been updated at least once a year. The UE were ranked according to the North American Industrial Classification System (Sistema de Clasificación Industrial para América del Norte - SCIAN). SCIAN). INEGI (2013) described this classification in five levels: sector, sub-sector, branch, sub-branch and class (Table 1). A sector consists of subsectors, a subsector is divided into branches, a branch derives into sub-branches and a sub-branch is broken down into classes. Each UE has the following attributes: unique identifier, SCIAN activity code, entity key and municipality key. The geographic location and municipal population were obtained from the national geostatistical framework (INEGI, 2014).

As target class labels, the typologies of social lag at the municipal level, low (B), medium (M) and high (A) considered in the database described by Vargas-Chanes and Valdés-Cruz (2019) were used. In the information sources, the municipality key was used and 2457 municipalities were identified; of which 971 (39.51 %) correspond to class B, 1064 (43.30 %) to class M, and 422 (17.17 %) to class A. Therefore, there were unbalanced target classes.

Database processing

Database collection, processing and integration was performed in the Python v. 3.8 programming language. The machine learning models were implemented in the Scikit-learn v. 0.23.2 platform (Pedregosa *et al.*, 2011). A MacBook Air 2017 computer

Table 1. Hierarchical structure of the North American-Mexico industrial classification system to identify economic units; digits and number of categories by level of aggregation.

Digits by activity	Aggregation level	Economic categories
2	Sector	20
3	Sub-sector	94
4	Branch	303
5	Sub-branch	614
6	Class	1059

Source: INEGI (2013).

with macOS 10.14 Mojave 64-bit operating system, Intel Core i5 1.8 GHz processor and 8 GB of RAM was used to run the processes.

Using the 2015 UE data and the 2014 national geostatistical framework, for each level of aggregation and each municipality, the rate of municipal UE categories (TUE) was calculated, defined as:

$$TUE_{c,m} = \frac{UE_{c,m}}{P_m} \times 1000$$

where $TUE_{c,m}$ is the UE rate for the c -th category (of the k aggregation level in the SCIAN) and m -th municipality, per thousand inhabitants; $c = 1, 2, \dots, nk$; $nk = (20, 94, 303, 614, 1059)$; $m = 1, 2, \dots, 2457$; $UE_{c,m}$ is the UE count for specific c and m , in each level k and; P_m is the population of the municipality.

Five data entry scenarios were defined: sector, sub-sector, branch, sub-branch and class, according to the five hierarchies defined by SCIAN. The variables TUE were calculated for the economic categories defined in each scenario and two geographic variables, latitude and longitude of each municipality, were added. Thus, the first data input scenario consisted of 22 input variables ($20 TUE + 2$) for the sector level, 96 for sub-sector, 305 for branch, 616 for sub-branch; and 1061 for class.

Machine learning classifiers

Three machine learning models were implemented: logistic regression (LR); support vector machine (SVM); and random forests (RF) for the different input scenarios.

Logistic regression model

The linear binary classifier LR is based on the statistical theory of generalized linear models and uses the link function *logit* (McCullagh y Nelder, 1989). Which is defined as:

$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

where p is the probability of the event of interest.

Then, LR is modeled as the linear combination of the parameters and the input characteristics, i.e:

$$\text{logit}(p^{(i)}) = \sum_{j=0}^m w_j x_j^{(i)} = z^{(i)}$$

where w_j is the j -th parameter and $x_j^{(i)}$ is the j -th characteristic of the i -th sample of the training data set.

In this study, the LR model was considered with an L2 regularization term (James *et al.*, 2019) to avoid overfitting the model to the training data; which consists of optimizing the loss function $J(w)_{LR}$ expressed by:

$$J(w)_{LR} = \sum_{i=1}^n \left[-y^{(i)} \log(\phi(z^{(i)})) - (1 - y^{(i)}) \log(1 - \phi(z^{(i)})) \right] + \frac{\lambda}{2} \sum_{j=1}^m w_j^2$$

where $\phi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$ is the sigmoid activation function; w_j the j -th parameter, note that w_0 it is not penalized; $y^{(i)}$ is the target class of the i -th sample, which considers the values 0 and 1; λ is the regularization hyperparameter L2; n is the number of samples or observations; and m is the number of parameters. This model is generalized for multiple classes, by means of the multiple classification approaches: one versus the rest and one versus one, combining binary classifiers.

Another approach to multi-class classification with this model is addressed by means of the *softmax* function, which is defined as,

$$p(y = k | z) = \phi(z) = \frac{e^{z_k}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}}$$

where K represents the number of target classes; k is a particular class to calculate the softmax function; and z_k is the linear combination of a particular class with its own vector of weights. *Softmax* obtains the belonging probabilities for each class and the maximum probability is used to make a prediction. The cost function used for RL is the cross-entropy function, which is defined as:

$$j(w) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K y_k^{(i)} \log(p(y = k | z))$$

where $y_k^{(i)}$ is the probability that the sample i belongs to the class k ; m is the number of samples; and K the number of target classes. In particular, if $K=2$, the cost function of the binary RL model is obtained.

Support Vector Machine

The SVM classifier consists of maximizing the margin of the hyperplane separating two classes. The margin is defined as the distance between the separation hyperplane and the training samples closest to it. SVM was used under the multiclass one versus the rest classification approach for the three classes of social lag considered in this

study. SVM with L2 regularization for margin-flexible classification, consisted of minimizing the loss function $J(w)_{SVM}$ (Wang *et al.*, 2006), which is expressed by:

$$J(w)_{SVM} = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^m \xi^{(i)^2}$$

$$t^{(i)} (w^T x^{(i)} + b) \geq 1 - \xi^{(i)}$$

where w is the vector of weights or parameters; b is the bias term; $t^{(i)}$ is the target class of the i -th sample, which considers the values -1 and 1; C is a hyperparameter that controls the width of the hyperplane margin and, hence, of the L2 regularization term; and ξ is a slack variable introduced by Cortes and Vapnik (1995) to deal with nonlinearly separable data.

In a binary classification we have two cases $w_0 + w^T x^{(i)} \geq 1 - \xi^{(i)}$ for $t^{(i)} = 1$ and $w_0 + w^T x^{(i)} \leq 1 - \xi^{(i)}$ for $t^{(i)} = -1$, where $x^{(i)}$ is the i -th sample of the training data set.

The use of kernel functions (Bishop, 2006) facilitates the solution of nonlinear classification problems by means of linear combinations of the input variables or characteristics projected into a higher dimensional space. The kernels used are linear, $K(x^{(i)}, x^{(j)}) = x^{(i)^T} x^{(j)}$; radial basis function (rbf), $K(x^{(i)}, x^{(j)}) = e^{-\gamma \|x^{(i)} - x^{(j)}\|^2}$; and sigmoid, $K(x^{(i)}, x^{(j)}) = \tanh(\gamma \cdot x^{(i)^T} x^{(j)} + r)$; where γ and r are hyperparameters that are optimized by means of a grid with intervals of discrete values.

Random forests

The RF classifier proposed by Breiman (2001) is an ensemble method that uses combinations of a given number of decision trees. These are taken from a random sample with replacement and trained on a given number of input characteristics taken from a sample without replacement. After the decision trees are generated, the majority vote is used to predict a class. This approach seeks to minimize the entropy or Gini impurity of the model's decision trees. The entropy measure $I_E(q)$ for non-empty classes is defined as,

$$I_E(q) = - \sum_{k=1}^C p(k|q) \log_2(p(k|q))$$

where $p(k|q)$ is the proportion of observations of a node q , which belong to the class k , such that $I_E(q) = 0$, if all examples of the node belong to the same class; and $I_E(q) = 1$ if the observations are distributed in the classes uniformly.

The Gini impurity criterion $I_G(q)$, is defined as:

$$I_G(q) = - \sum_{k=1}^K p(k|q)(1 - p(k|q)) = 1 - \sum_{k=1}^K p(k|q)^2$$

where $I_G(q)$ reaches its maximum value when the samples have a uniform distribution within classes (Raschka and Mirjalili, 2019).

The hyperparameters of the RF model that are optimized by means of a grid search are the number of estimators (decision trees) of the model (NE); the quality criterion for splitting the nodes (CR); the maximum depth of the decision trees (MP) controlling the complexity of the model; and the maximum number of characteristics or input variables (MC) that are randomly chosen to split the nodes.

Performance metrics

The following metrics were used to evaluate the performance of the classifiers: global accuracy (ACC , accuracy), precision (P), sensitivity (S), F1 score, F1-macro value, and area under the curve (AUC) of the ROC curve and the P-S curve.

The confusion matrix describes the class predictions (represented by columns) versus the true classes (represented by rows). For the binary case (Table 2) this matrix reports the number of true positives (VP), positive observations, predicted as positive; the number of false positives (FP), negative observations predicted as positive; the number of false negatives (FN), positive observations predicted as negative; and the number of true negatives (VN), negative observations predicted as negative.

ACC defined as:

$$ACC = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$$

P is the fraction of VP with respect to the total predicted positives and is calculated by:

$$P = \frac{VP}{VP + FP}$$

S is the fraction of VP with respect to the total observed positives and is defined as:

Table 2. Description of a confusion matrix for the case of a binary classifier.

		Predicted classes	
		Positive	Negative
True classes	Positive	VP	FN
	Negative	FP	VN

VP : true positive; FN : false negative; FP : false positive; VN : true negative.

$$S = \frac{VP}{VP + FN}$$

F1 represents the harmonic mean of P and S , that is:

$$F1 = \frac{2PS}{P + S}$$

where F1 takes values between 0 and 1; 0 indicates a poor fit and 1 a perfect fit. The metric F1 favors classifiers with P and S the like (Géron, 2019).

F1-*macro*, in the case of a multi-class problem, it is calculated as the arithmetic average of the measurements F1 obtained for each class:

$$F1 - macro = \frac{1}{N} \sum_i^N F1_i$$

where $F1_i$ is the value of F1 of the i -th target class; and N is the total number of classes. This metric is appropriate when there are unbalanced classes; each class has equal weight and emphasis is placed on the classes with lower frequency (Lipton *et al.*, 2014).

The ROC curve associates the rate of VP on the vertical axis versus the rate of FP on the horizontal axis. To compare the performance of the classifiers AUC is used, which varies between 0 and 1, values close to 1 indicate a good performance of the classifier (Fawcett, 2006). In the case of a binary classification there is one ROC curve per model, and in the multiclass case there is one ROC curve for each class of the model. The P-S curve represents the plot of values of S on the horizontal axis versus values of P on the vertical axis. The value AUC of the P-S curve takes values between 0 and 1, values close to 1 indicate a good performance of the model. In the binary case, when the data are not balanced, the P-S curve is more appropriate to compare the performance of the classifiers (Saito and Rehmsmeier, 2017).

Classifier training

Variable scaling

The input dataset (or characteristics) was standardized before performing the training of the LR, SVM and RF classifiers, based on the expression,

$$x_j' = \frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j}$$

where x_j' is a vector of observations of the j -th input characteristic, from the training set of n observations; μ_j is the sample mean of x_j' ; and σ_j is the sample standard deviation.

Variable scaling improves the performance of optimization algorithms. The scaling parameters μ_j and σ_j of each characteristic j are then applied to transform the test set characteristics and evaluate the performance of the classifiers.

Hyperparameter selection

The selection of optimal hyperparameters for each classifier was performed by means of a grid search and cross-validation (CV) with $k=10$ partitions. A random partition was used with 1965 observations (80 %) from the input data set. For each classifier, the hyperparameter combination that obtained the maximum average value of the F1-macro criterion was selected from the possible combinations in each hyperparameter grid.

The hyperparameters and value ranges analyzed for each classifier are described in Table 3. In particular, LR was trained with the inverse of the L2 regularization hyperparameter, with two classification strategies: one versus the rest and multinomial; and optimized with the L-BFGS-B algorithm (Morales and Nocedal, 2011).

Evaluation of model performance

The evaluation of the final performance of the LR, SVM and RF classifiers was performed with the complete datasets (2457 observations) and with the set of input variables or characteristics retained. The CV procedure was performed with $k=5$ random partitions, stratified by the three social lag classes to obtain the average performance metrics. The predictive capacity of the three classifiers was evaluated with the same input scenarios (categories in the SCIAN) and random partitions of the data to avoid biases in the comparison of their predictive performance.

Table 3. Hyperparameters and value ranges, from logistic regression (LR), support vector machine (SVM) and random forest (RF) classifiers.

Model	Hyperparameter	Range
LR	λ	0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000 and 10 000
	method	one <i>versus</i> the rest and multinomial
SVM	Kernels	Linear, sigmoid and rbf
	C	0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 y 1000
	γ	0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 y 1000 (kernels sigmoid and rbf)
	r	0, 1, 2,3, 4, y 5 (kernel sigmoid)
RF	NE	100, 150, 200, 250, 300, 350, y 400
	CR	Entropy and Gini
	MC	Square root and logarithm base 2
	MP	10, 15, 20, 25, y 30

NE : number of estimators; CR : division criterion; MC : maximum number of characteristics; MP : maximum depth. The ranges of values were selected heuristically and experimentally.

RESULTS AND DISCUSSION

The optimized data input scenarios and hyperparameters of the classifiers were as follows: LR (at subsector level, $\lambda=10$); SVM (at subsector level, sigmoid kernel, $C=100$, $r=0$ and $\gamma=0.0001$); and RF (at subsector level, entropy CR , $MP=20$, $MC=\sqrt{96}$ and $NE=250$). According to the optimized L2 regularization hyperparameters, LR required more regularization than SVM. Of the five data input scenarios analyzed, the SCIAN subsector aggregation level obtained the best predictive performance in all three models.

RF outperformed LR and SVM with the metrics $F1$ -macro and ACC . RF outperformed LR and SVM for P in classes B and A; for S in class M; and for $F1$ in classes B and M. LR outperformed SVM and RF for P in class M, and for S in class B. SVM outperformed LR and RF for S and $F1$ in class A. Furthermore, it was observed that all three classification models performed better in identifying class B (Table 4). For the social lag class A, RF minimized FP ($P=0.668$); that is, RF obtained the best performance for predicting class A. In turn, SVM minimized FN ($S=0.616$); that is, SVM identified the largest number of true A classes.

The ROC curves for each target class of the RF classifier show that the maximum value of AUC corresponded to class B and the minimum value corresponded to class M; while the P-S curves show that RF obtained better performance for classifying class B and the lowest performance was obtained with class A (Figure 1). The optimistic view of the ROC curve is attributed to the non-uniform distribution of the three classes of social lag to evaluate the performance of the classifiers. In this type of situation there are more robust alternatives such as the concentrated ROC curve, the cost curve and the P-S curve, the latter option is considered the most appropriate (Saito and Rehmsmeier, 2015). Another way to measure the performance of the RF classifier is by means of the normalized confusion matrix, which describes the proportion of true classes within each predicted class; this matrix shows the percentages of observations that belong to the correctly predicted class; these are 78, 79, and 54 %, for classes B,

Table 4. Average prediction performance criteria of logistic regression (LR), support vector machine (SVM) and random forest (RF) classifiers with cross-validation ($k=5$).

Model	$F1$ -macro	ACC	Class	P	S	$F1$
LR	0.709 +/- 0.028	0.732 +/- 0.016	B	0.839	0.786	0.812
			M	0.687	0.737	0.711
			A	0.617	0.595	0.606
SVM	0.708 +/- 0.024	0.728 +/- 0.016	B	0.836	0.777	0.805
			M	0.685	0.727	0.706
			A	0.612	0.616	0.614
RF	0.716 +/- 0.021	0.744 +/- 0.010	B	0.864	0.785	0.822
			M	0.679	0.789	0.730
			A	0.668	0.538	0.596

ACC : global accuracy; target classes of social lag (low: B, medium: M, and high: A); precision (P); sensitivity (S); and metric $F1$.

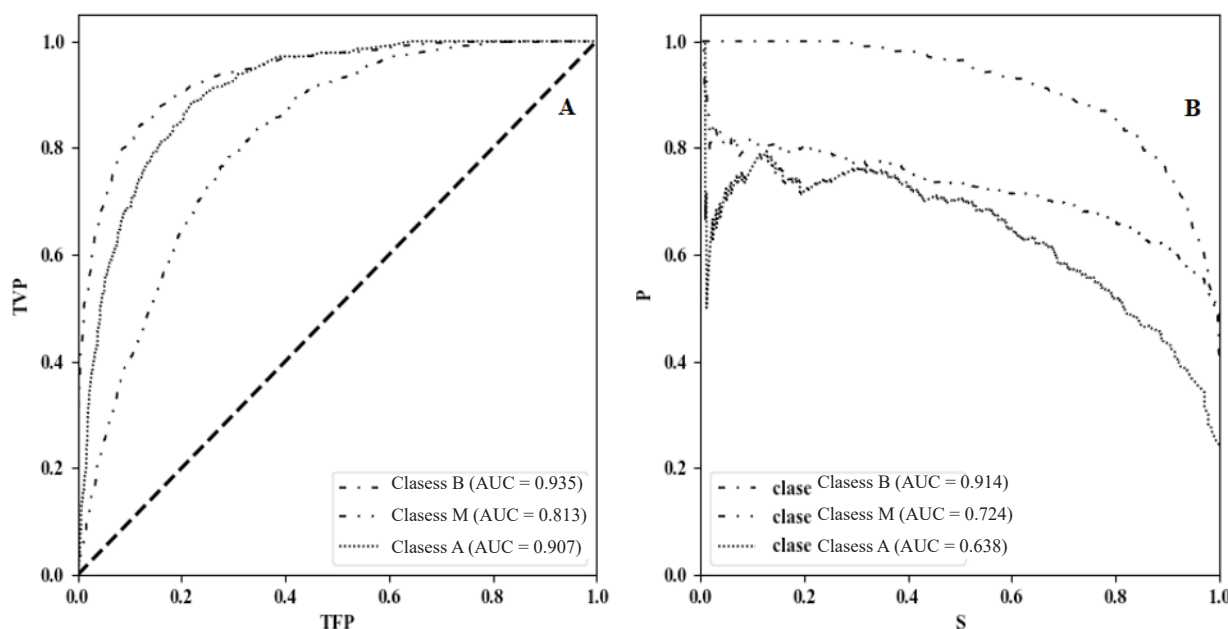


Figure 1. Performance curves of the random forest (RF) classifier for predicting social lag classes in Mexico (low: B, medium: M, and high: A) in Mexico. A: ROC curve and B: P-S curve; P: precision; S: sensitivity; TVP: true positive rate; TFP: false positive rate; AUC: areas under the ROC curve; and P-S curve.

M, and A, respectively (Figure 2). Classes M and B had better prediction than class A; samples from class M were mistaken for class A.

The predictions of the social lag classes of the RF model from EU aggregated at the subsector level were used to make a comparison of the geographic distribution at the municipal level with the lag classes reported by Vargas-Chanes and Valdés-Cruz (2019). The maps show that the geographic distribution of class B is mostly located in northern Mexico and in both maps the distributions are very similar. The distribution of class M is very similar in the center and southeast, and in the north in some municipalities, the RF model classifies them as class B or class A. The distribution of class A is very similar in central and southeastern Mexico; however, in the north, RF classifies some class A municipalities as class M (Figure 3).

The RF model optimized with 2015 data was used to make the predictions of the degrees of social lag from UE of October 2016 and November 2017 data from the DENU (Figure 4); where it is observed that the geographic distribution of the classes of social lag is very similar to that reported by Vargas-Chanes and Valdés-Cruz (2019). The application of the machine learning approach proposed in this research to predict social lag in Mexico is a novel, feasible, and low-cost approach; in particular, because of the type of data or input variables used in this work. The results show that from 2015 to 2016, there was a decrease in the proportion of municipalities with high social lag from 17.2 to 15.5 % (Table 5). That is, 42 municipalities went from a high to a medium

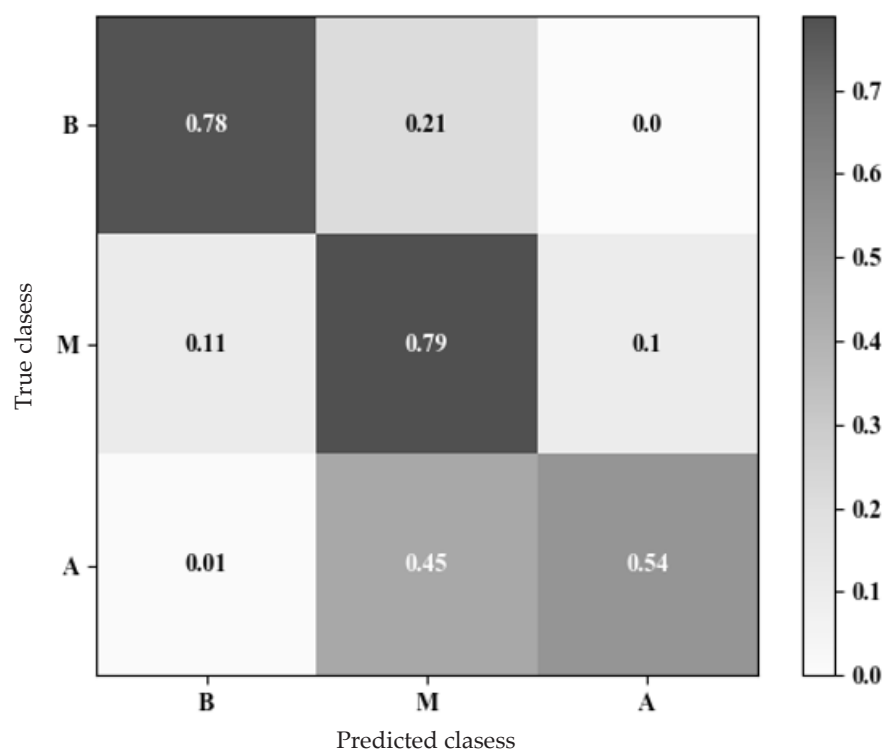


Figure 2. Normalized confusion matrix of the classifier random forests (RF) to predict social lag classes (low: B, medium: M, and high: A) in Mexico.

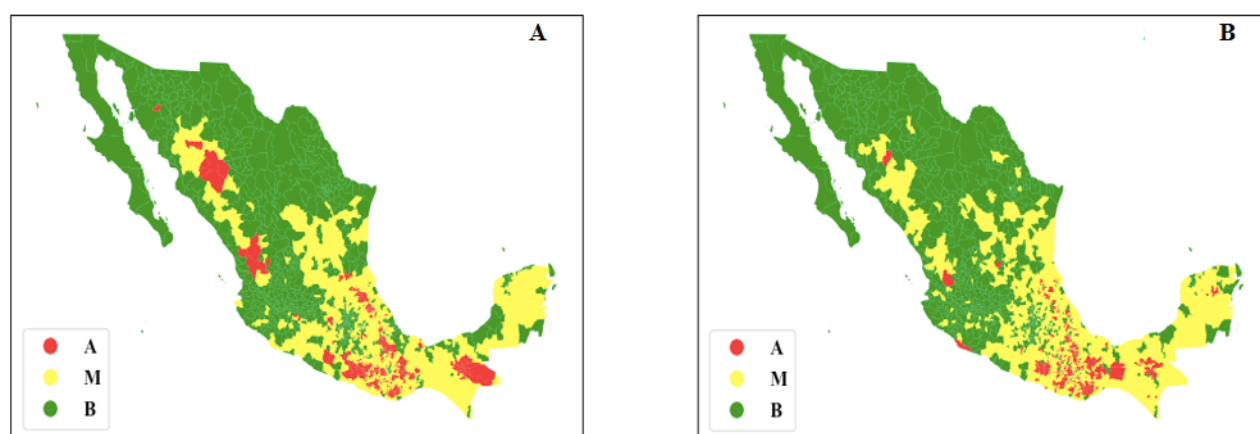


Figure 3. Municipal geographic distribution of the classes of social lag (low, medium and high): B, medium: M, and high: A) in 2015 in Mexico. A: values reported by Vargas-Chanes and Valdés-Cruz (2019) *versus* B: predictions made with the random forests (RF) classifier from 2015 data of economic units aggregated at the subsector level.

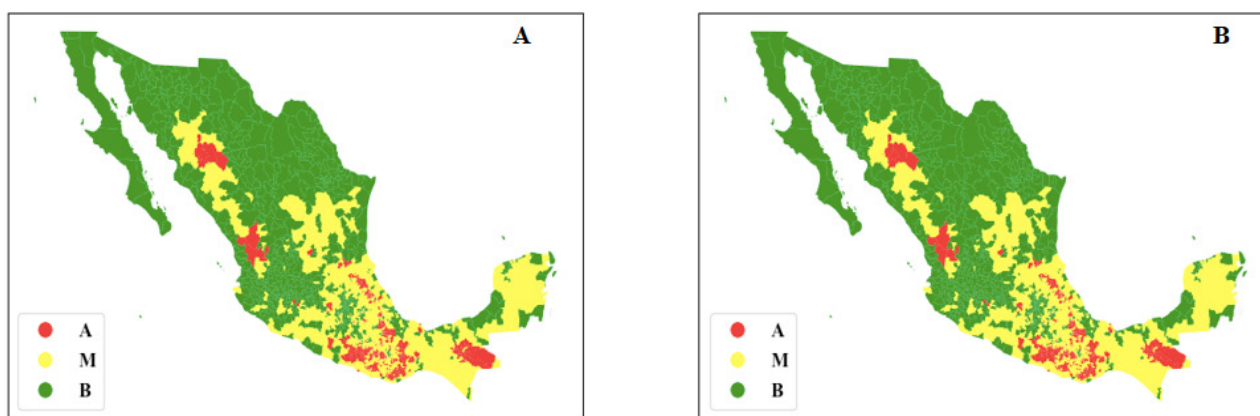


Figure 4. Municipal geographic distribution of the classes of social lag (low, medium and high): B, medium: M, and high: A) predicted with the random forest classifier (RF) in Mexico. A: from October 2016 economic unit (UE) data; and B: UE of November 2017, aggregated at the subsector level based on data from the DENUE.

Table 5. Total number of municipalities (percentages) predicted with the random forest (RF) model by category of social lag (low B, medium: M, and high: A) in 2016 and 2017 in Mexico. Year 2015 shows the RF model test data.

Year	Total and percentage of municipalities per class of social lag		
	B	M	A
2015	971 (39.5 %)	1064 (43.3 %)	422 (17.2 %)
2016	971 (39.5 %)	1106 (45.0 %)	380 (15.5 %)
2017	976 (39.7 %)	1101 (44.8 %)	380 (15.5 %)

degree of social lag, and no changes were observed in municipalities with low social lag. On the other hand, predictions for 2016 and 2017 show that municipalities with high social lag did not change, and five municipalities with medium social lag in 2016 moved to a low degree of social lag. Most of the municipalities did not present changes in the predicted degree of social lag, despite the fact that data from two consecutive years of the DENUE were used as input variables for the RF model.

The municipalities that changed their level of social lag positively from 2016 to 2017, according to the RF model are: Eduardo Neri, Guerrero; Comonfort, Guanajuato; El Marqués, Querétaro; Tapalpa, Jalisco; and Perote, Veracruz. The municipalities Eduardo Neri, Guerrero; Tapalpa, Jalisco; and Comonfort, Guanajuato had slight increases in UE in 2017, mainly in those UE related to retail trade. The municipality of El Marqués, Querétaro, significantly increased the registration of UE related to construction and industry; this was detected by the model and predicted the change. Finally, the municipality of Perote, Veracruz, presented mixed changes in the different degrees of social lag at the subsector level, so further analysis is required to explain the changes in the prediction of social lag.

Based on the above, the proposed methodology for predicting the degree of social lag based on UE information obtained results similar to traditional methodologies that use population and housing census data, which highlight the little variation in the levels of lag at the municipal level during the time period analyzed. In this context, the capacity of decision-makers responsible for mitigating social lag in Mexico is limited, particularly in areas of high social lag.

The ordinal nature of the degrees of social lag was not considered in this study in order to optimize the performance of the machine learning classifiers. As shown in other studies (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2020) the performance of classifiers improves, under the assumption of an equidistant hierarchy between the target classes under investigation. Likewise, it is possible to improve the performance of machine learning classifiers to predict a specific class or social lag category of interest, this allows determining an optimal metric for a specific class (e.g., high social lag) ; in this case, the AUC metric of the P-S curve for class A is used as a performance criterion, instead of the metric ACC used in this study.

CONCLUSIONS

The machine learning classifiers of logistic regression, support vector machine and random forests implemented in this research obtained a good prediction performance to predict the classes or degrees of low, medium and high social lag at the municipal level based on data from the national directory of economic units aggregated at the subsector level (94 subsectors) and their geographic location.

In particular, the random forest classifier obtained the best average prediction performance with an overall classification accuracy of 74.4 % and F1-macro of 71.6 %. The low and medium social lag classes were predicted more accurately than the high social lag class. The results of the study show a strong correlation between the degrees of social lag at the municipality level and the data of the corresponding economic units.

The geographic distribution of social lag classes predicted in 2015 with the random forest model from economic units was very similar to the geographic distribution of social lag reported in 2015. The predictions of social lag for 2016 and 2017 made with the proposed approach show that it is possible to predict the degree of social lag indirectly and at low cost, when population and housing census statistics are not available to determine social lag.

REFERENCES

- Alsharkawi A, Al-Fetyani M, Dawas M, Saadeh H, Alyaman M. 2021. Poverty classification using machine learning: the case of Jordan. Sustainability. 13: 1–16. <https://doi.org/10.3390/su13031412>
- Bishop CM. 2006. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer. New York, NY, USA. pp: 291–294.
- Breiman L. 2001. Random Forests. Machine Learning 45: 5–32.
- Cao W, Mirjalili V, Raschka S. 2020. Rank consistent ordinal regression for neural networks with application to age estimation. Pattern Recognition Letters 140: 325–331. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.07884>

- CONEVAL (Consejo Nacional para la Evaluación de la Política de Desarrollo Social). 2016. Índice de Rezago Social 2015. Presentación de Resultados. https://www.coneval.org.mx/Medicion/Documents/Indice_Rezago_Social_2015/Nota_Rezago_Social_2015_vf.pdf (Retrieved: January 2021).
- Cortes C, Vapnik V. 1995. Support-vector networks. *Machine Learning* 20: 273–297.
- Dalénus T, Hodges J. 1959. Minimum variance stratification. *Journal of the American Statistical Association* 54: 88–101.
- Engstrom R, Hersh J, Newhouse D. 2017. Poverty from Space: Using High-Resolution Satellite Imagery for Estimating Economic Well-Being. World Bank Policy Research Working Paper No. 8284. <https://ssrn.com/abstract=3090770> (Retrieved: February 2021).
- Fawcett T. 2006 An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters* 27: 861–874.
- Géron A. 2019. Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems 2nd ed. O'Reilly Media. Sebastopol, CA, USA. pp: 60–66.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Sistema de Clasificación. Industrial de América del Norte, México SCIAN 2013. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/clasificadores/SCIAN/SCIAN_2013/702825051693.pdf (Retrieved: January 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Marco geoestadístico 2014 versión 6.2 (DENUE). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004386> (Retrieved: January 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Directorio Nacional de Unidades Económicas DENUE. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx> (Retrieved: January 2021).
- James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. 2013. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R. Springer. New York, NY, USA. pp: 215–219.
- Lipton ZC, Elkan C, Naryanaswamy B. 2014. Optimal Thresholding of Classifiers to Maximize F1 Measure. In: Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Calders T, Esposito F, Hüßlermeier E, Meo R. (eds.) ECML PKDD 2014. Lecture Notes in Computer Science 8725. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44851-9_15
- McCullagh P, Nelder JA. 1989. Generalized Linear Models, volume 37 of Monographs on Statistics and Applied Probability. 2a Ed. Chapman and Hall. London, UK. 532 p.
- Morales JL, Nocedal J. 2011. Remark on “algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization”. *ACM Transactions on Mathematical Software* 38(1): 1–4. <https://doi.org/10.1145/2049662.2049669>
- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V, Vanderplas J, Passos A, Cournapeau D, Brucher M, Perrot M, Duchesnay É. 2011. Scikit-learn: Machine learning in python. *Journal of Machine Learning Research* 12(85): 2825–2830.
- Pérez-Rodríguez P, Flores-Galarza S, Vaquera-Huerta H, Del Valle-Paniagua DH, Montesinos-López OA, Crossa J. 2020. Genome-based prediction of Bayesian linear and non-linear regression models for ordinal data. *Plant Genome* 13: 1–13. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20021>
- Powell LM, Slater S, Mirtcheva D, Bao Y, Chaloupka FJ. 2007. Food store availability and neighborhood characteristics in the United States. *Preventive Medicine* 44: 189–195.
- Raschka S, Mirjalili V. 2019. Python Machine Learning 3rd ed. Packt Publishing Ltd. Birmingham, UK. pp: 90–96.
- Saito T, Rehmsmeier M. 2015. The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets. *PLoS ONE* 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118432>
- Saito T, Rehmsmeier M. 2017. Precrec: fast and accurate precision-recall and ROC curve calculations in R. *Bioinformatics* 33: 145–147. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btw570>
- Sani NS, Rahman MA, Bakar AA, Sahran S, Sarim HM. 2018. Machine learning approach for bottom 40 percent households (B40) poverty classification. *International Journal on Advanced Science, Engineering, and Information Technology* 8: 1698–1705. <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.8.4-2.6829>
- Vargas-Chanes D, Valdés-Cruz S. 2019. A longitudinal study of social lag: regional inequalities of growth in Mexico 2000 to 2015. *Journal of Chinese Sociology* 6: 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40711-019-0100-6>
- Wang L, Zhu J, Zou H. 2006. The doubly regularized support vector machine. *Statistica Sinica* 16: 589–615.

PREDICCIÓN DEL REZAGO SOCIAL EN MÉXICO: UN ENFOQUE DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO A PARTIR DE DATOS DE UNIDADES ECONÓMICAS

Pablo Rodrigo Ávila-Solís¹, Juan Manuel González-Camacho^{1*},
Delfino Vargas-Chanes², Paulino Pérez-Rodríguez¹

¹ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática-Cómputo Aplicado. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56230.

² Universidad Nacional Autónoma de México. Programa Universitario de Estudios del Desarrollo. Avenida Universidad, 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Mexico City, Mexico. C. P. 04510.

* Corresponding author: jmgc@colpos.mx

RESUMEN

El rezago social en México se calcula oficialmente a nivel municipal cada cinco años, con base en datos del censo de población y vivienda, por el Consejo Nacional para la Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Sin embargo, es recomendable contar con predicciones anuales del rezago social para el seguimiento de políticas públicas. En este estudio se presenta un enfoque de aprendizaje automático para predecir las clases o grados de rezago social (alto, medio, bajo) a nivel municipal en México, a partir de la información de unidades económicas proveniente del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del año 2015. Se implementaron tres clasificadores de aprendizaje automático supervisado: regresión logística, máquina de soporte vectorial y bosques aleatorios, y se entrenaron y probaron en predicción con base en información de conteos de las unidades económicas, en sus diferentes categorías, población y coordenadas geográficas de los municipios; asimismo se utilizaron clases de rezago social objetivo a nivel municipal, calculadas con información censal de 2015, reportadas en la literatura. Los criterios para evaluar el desempeño de los clasificadores fueron el valor de F-macro, la precisión global y el área bajo la curva ROC. Los resultados indican que el mejor desempeño global se obtuvo con el clasificador bosques aleatorios con un valor F-macro de 0.713 y una precisión global de clasificación de 0.716; y valores F1-macro para las clases de rezago social alto, medio, y bajo de 0.596, 0.730, y 0.822 respectivamente. Este clasificador se utilizó para predecir el rezago social para los años 2016 y 2017. Los resultados muestran que existe una relación entre el rezago social y las unidades económicas agregadas a nivel subsector; y que el enfoque propuesto representa una alternativa viable y de bajo costo para predecir el rezago social cuando se carece de información censal.

Palabras clave: árboles de decisión, pobreza, modelos de clasificación, regresión logística, inteligencia artificial.

Citation: Rodrigo Ávila-Solís P, González-Camacho JM, Vargas-Chanes D, Pérez-Rodríguez P. 2022. Prediction of social lag in Mexico: a machine learning approach from economic unit data. *Agrociencia* <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2768>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: September 01, 2021.
Approved: March 08, 2022.
Estimated publication date:
April 18, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 233-263.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCCIÓN

En México, de acuerdo con la Ley General de Desarrollo Social vigente de 2004, los recursos y apoyos federales se distribuyen a nivel de municipios y se asignan en función del grado de rezago social. Por ello, es importante conocer periódicamente esta variable para identificar zonas de alto rezago. El rezago social, a diferencia de la pobreza, es un indicador socioeconómico de carencias sociales. CONEVAL (2016) reportó el agrupamiento del rezago social en cinco clases: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, con base en un análisis de componentes principales, la técnica de estratificación propuesta por Dalenius y Hodges (1959) e información de la encuesta intercensal 2015. Esta encuesta engloba 11 variables sociodemográficas relativas a educación, salud, servicios básicos, activos en el hogar y calidad de la vivienda.

La estimación del rezago social se realiza cada cinco años de manera oficial, debido a la disponibilidad de las variables socioeconómicas. Vargas-Chanes y Valdés-Cruz (2019) propusieron un método alternativo para estimar el rezago social a nivel municipal, definieron tres clases (bajo, medio y alto), con base en un análisis de clases latentes y datos de la encuesta intercensal 2015 reportada por CONEVAL (2016), para dar mayor soporte estadístico a la estimación de rezago social a nivel municipal.

En la literatura se reportan métodos indirectos para estimar indicadores socioeconómicos relacionados con la pobreza. Engstrom *et al.* (2017) realizaron una propuesta con un modelo de regresión múltiple con penalización L1 para estimar las tasas de pobreza y consumo promedio de 1291 municipios en Sri Lanka a partir de imágenes satelitales. Estos autores encontraron que las características obtenidas de las imágenes explican alrededor de 60 % de la variación de los datos estudiados. Alsharkawi *et al.* (2021) aplicaron 16 modelos de aprendizaje supervisado, con base en diferentes encuestas nacionales de hogares, para clasificar la situación de pobreza de hogares en Jordania. Entre los cuales destacan regresión logística, potenciación del gradiente, bosques aleatorios y máquina de soporte vectorial. Estos autores reportaron que el clasificador potenciación del gradiente obtuvo 81 % de desempeño con la métrica F1 con un conjunto de datos desbalanceado. Sani *et al.* (2018) utilizaron tres clasificadores para categorizar el ingreso mensual de los hogares de tres estados en Malasia: k-vecinos más cercanos, árboles de decisión y Bayesiano empírico. El clasificador árboles de decisión fue el más significativo para detectar si los hogares estaban dentro del 40 % más pobre o fuera de éste, con clases desbalanceadas.

Powell *et al.* (2007) estudiaron la disponibilidad de unidades económicas en Estados Unidos; tales como tiendas de alimentos agregadas por código postal. Estos autores aplicaron el análisis de regresión multivariado para asociar las características de la ubicación de vecindarios, a partir de datos censales del año 2000; e indicaron que los supermercados y tiendas de abarrotes se localizan en vecindarios con ingresos bajos. Esto muestra la posibilidad de calcular indicadores socioeconómicos de una región geográfica a partir de unidades económicas.

El objetivo de este estudio fue implementar tres modelos aprendizaje automático: regresión logística, máquina de soporte vectorial y bosques aleatorios para predecir

las clases de rezago social (bajo, medio y alto) a nivel municipal a partir de datos de 2015 de unidades económicas, población y coordenadas geográficas de los municipios; entrenar y evaluar en predicción con las clases de rezago social objetivo de 2015 reportadas por Vargas-Chanes y Valdés-Cruz (2019); y realizar con base en el enfoque propuesto, predicciones de los grados de rezago social a nivel municipal para los años 2016 y 2017.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta de datos

Para realizar el estudio se obtuvieron datos de las unidades económicas (UE), aproximadamente cinco millones de registros, procedentes de la quinta edición del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas – DENUE – (INEGI, 2015). INEGI realiza el DENUE desde 2010 y a partir de 2015 se ha actualizado al menos una vez al año. Las UE se jerarquizaron conforme al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN). INEGI (2013) describió esta clasificación en cinco niveles: sector, subsector, rama, subrama y clase (Cuadro 1). Un sector consta de subsectores, un subsector se divide en ramas, una rama deriva en subramas y una subrama se descompone en clases. Cada UE tiene los siguientes atributos: identificador único, código de actividad SCIAN, clave de entidad y clave de municipio. La localización geográfica y la población municipal se obtuvo del marco geoestadístico nacional (INEGI, 2014). Como etiquetas de clase objetivo se usaron las tipologías de rezago social a nivel municipal, bajo (B), medio (M) y alto (A) consideradas en la base de datos descrita por Vargas-Chanes y Valdés-Cruz (2019). En las fuentes de información se utilizó la clave de municipio y se identificaron 2457 municipios; de los cuales 971 (39.51 %) corresponden a la clase B, 1064 (43.30 %) a la clase M, y 422 (17.17 %) a la clase A; por lo tanto, se contó con clases objetivo no balanceadas.

Procesamiento de la base de datos

La recolección, procesamiento e integración de la base de datos se realizó en el lenguaje de programación Python v. 3.8. Los modelos de aprendizaje automático

Cuadro 1. Estructura jerárquica del sistema de clasificación industrial de América del Norte-México para identificar las unidades económicas; dígitos y número de categorías por nivel de agregación.

Dígitos por actividad	Nivel de agregación	Categorías económicas
2	Sector	20
3	Subsector	94
4	Rama	303
5	Subrama	614
6	Clase	1059

Fuente: INEGI (2013).

se implementaron en la plataforma *Scikit-learn* v. 0.23.2 (Pedregosa *et al.*, 2011). Para ejecutar los procesos se utilizó un equipo de cómputo MacBook Air 2017 con sistema operativo macOS 10.14 Mojave de 64 bits, procesador Intel Core i5 a 1.8 GHz y 8 GB de memoria RAM.

Con los datos de las UE de 2015 y el marco geoestadístico nacional de 2014, se calculó para cada nivel de agregación y cada municipio, la tasa de categorías de UE municipales (TUE) definida como:

$$TUE_{c,m} = \frac{UE_{c,m}}{P_m} \times 1000$$

donde $TUE_{c,m}$ es la tasa de UE para la c -ésima categoría (del nivel k de agregación del SCIAN) y m -ésimo municipio, por mil habitantes; $c = 1, 2, \dots, nk$; $nk = (20, 94, 303, 614, 1059)$; $m = 1, 2, \dots, 2457$; $UE_{c,m}$ es el conteo de UE para c y m específicos, en cada nivel k y; P_m es la población del municipio.

Cinco escenarios de entrada de datos se definieron: sector, subsector, rama, subrama y clase, de acuerdo con las cinco jerarquías definidas por el SCIAN. Las variables TUE se calcularon para las categorías económicas definidas en cada escenario y se agregaron dos variables geográficas, latitud y longitud de cada municipio. De este modo, el primer escenario de entrada de datos consistió en 22 variables de entrada ($20 TUE + 2$) para el nivel sector, 96 para subsector, 305 para rama, 616 para subrama; y 1061 para clase.

Clasificadores de aprendizaje automático

Tres modelos de aprendizaje automático se implementaron: regresión logística (LR, logistic regression); máquina de soporte vectorial (SVM, support vector machine); y bosques aleatorios (RF, random forests) para los diferentes escenarios de entrada de datos.

Modelo de regresión logística

LR es un clasificador binario lineal, que se basa en la teoría estadística de los modelos lineales generalizados y utiliza la función liga *logit* (McCullagh y Nelder, 1989). La cual se define como:

$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

donde p es la probabilidad del evento de interés.

LR se modela como la combinación lineal de los parámetros y las características de entrada, esto es:

$$\text{logit}(p^{(i)}) = \sum_{j=0}^m w_j x_j^{(i)} = z^{(i)}$$

donde w_j es el j -ésimo parámetro y $x_j^{(i)}$ es la j -ésima característica de la i -ésima muestra del conjunto de datos de entrenamiento.

En este trabajo se consideró el modelo LR con un término de regularización L2 (James *et al.*, 2019) para evitar el sobreajuste del modelo con los datos de entrenamiento; el cual consiste en optimizar la función de pérdida $J(w)_{LR}$ expresada por:

$$J(w)_{LR} = \sum_{i=1}^n \left[-y^{(i)} \log(\phi(z^{(i)})) - (1 - y^{(i)}) \log(1 - \phi(z^{(i)})) \right] + \frac{\lambda}{2} \sum_{j=1}^m w_j^2$$

donde $\phi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$ es la función de activación sigmoide; w_j el j -ésimo parámetro, nótese que w_0 no se penaliza; $y^{(i)}$ es la clase objetivo de la i -ésima muestra, que considera los valores 0 y 1; λ es el hiperparámetro de regularización L2; n es el número de muestras u observaciones; y m es el número de parámetros. Este modelo se generaliza para clases múltiples, por medio de los enfoques de clasificación múltiple: uno *versus* el resto y uno *versus* uno, combinando clasificadores binarios.

Otro enfoque para la clasificación clases múltiples con este modelo se aborda por medio de la función *softmax*; la cual se define como,

$$p(y = k | z) = \phi(z) = \frac{e^{z_k}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}}$$

donde K representa el número de clases objetivo; k es una clase, en particular, para calcular la función *softmax*; y z_k es la combinación lineal de una clase, en particular, con su propio vector de pesos. *Softmax* obtiene las probabilidades de pertenencia para cada clase y la probabilidad máxima se utiliza para realizar una predicción. La función de costo utilizada para RL es la función de entropía cruzada, la cual se define como,

$$j(w) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K y_k^{(i)} \log(p(y = k | z))$$

donde $y_k^{(i)}$ es la probabilidad de que la muestra i pertenezca a la clase k ; m es el número de muestras; y K el número de clases objetivo. En particular, si $K = 2$, se obtiene la función de costo del modelo RL binario.

Máquina de soporte vectorial

El clasificador SVM consiste en maximizar el margen del hiperplano que separa dos clases. El margen se define como la distancia entre el hiperplano de separación y las muestras de entrenamiento más cercanas a éste. SVM se utilizó bajo el enfoque de clasificación multiclase uno versus el resto, para las tres clases de rezago social consideradas en este estudio. SVM con regularización L2 para clasificación margen-flexible, consistió en minimizar la función de pérdida $J(w)_{SVM}$ (Wang *et al.*, 2006), la cual se expresa por,

$$J(w)_{SVM} = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^m \xi^{(i)^2}$$

$$t^{(i)} (w^T x^{(i)} + b) \geq 1 - \xi^{(i)}$$

donde w es el vector de pesos o parámetros; b es el término de sesgo; $t^{(i)}$ es la clase objetivo de la i -ésima muestra, que considera los valores -1 y 1; C es un hiperparámetro que controla el ancho del margen del hiperplano y, por ende, del término de regularización L2; y ξ es una variable de holgura introducida por Cortes y Vapnik (1995) para tratar con datos no linealmente separables.

En una clasificación binaria se tienen dos casos $w_0 + w^T x^{(i)} \geq 1 - \xi^{(i)}$ para $t^{(i)} = 1$ y $w_0 + w^T x^{(i)} \leq 1 - \xi^{(i)}$ para $t^{(i)} = -1$, donde $x^{(i)}$ es la i -ésima muestra del conjunto de datos de entrenamiento.

El uso de funciones kernel (Bishop, 2006) facilita la solución de problemas de clasificación no lineal, por medio de combinaciones lineales de las variables o características de entrada proyectadas en un espacio de dimensión más alta. Los kernels utilizados son lineal, $K(x^{(i)}, x^{(j)}) = x^{(i)^T} x^{(j)}$; función de base radial (rbf), $K(x^{(i)}, x^{(j)}) = e^{-\gamma \|x^{(i)} - x^{(j)}\|^2}$; y sigmoide, $K(x^{(i)}, x^{(j)}) = \tanh(\gamma \cdot x^{(i)^T} x^{(j)} + r)$; donde γ y r son hiperparámetros que se optimizan por medio de una retícula con intervalos de valores discretos.

Bosques aleatorios

El clasificador RF propuesto por Breiman (2001) es un método de ensamble que utiliza combinaciones de un número determinado de árboles de decisión. Estos se toman de una muestra aleatoria con remplazo y son entrenados a partir de un número determinado de características de entrada tomadas de una muestra sin remplazo. Después de que se generan los árboles de decisión se utiliza el voto mayoritario para predecir una clase. Este enfoque busca minimizar la entropía o la impureza de Gini de los árboles de decisión del modelo. La medida de entropía $I_E(q)$ para las clases no vacías se define como,

$$I_E(q) = - \sum_{k=1}^c p(k|q) \log_2(p(k|q))$$

donde $p(k|q)$ es la proporción de observaciones de un nodo q , que pertenecen a la clase k , de forma que $I_E(q) = 0$ si todos los ejemplos del nodo pertenecen a la misma clase; y $I_E(q) = 1$ si las observaciones se distribuyen en las clases de forma uniforme.

El criterio de impureza de Gini $I_G(q)$, se define como,

$$I_G(q) = - \sum_{k=1}^K p(k|q)(1 - p(k|q)) = 1 - \sum_{k=1}^K p(k|q)^2$$

donde $I_G(q)$ alcanza su valor máximo cuando las muestras tienen una distribución uniforme dentro de las clases (Raschka y Mirjalili, 2019).

Los hiperparámetros del modelo RF que se optimizan por medio de una búsqueda por retícula son el número de estimadores (árboles de decisión) del modelo (NE); el criterio de calidad para dividir los nodos (CR); la profundidad máxima de los árboles de decisión (MP) que controla la complejidad del modelo; y el número máximo de características o variables de entrada (MC) que se eligen al azar para dividir los nodos.

Métricas de desempeño

Para evaluar el desempeño de los clasificadores se utilizaron las siguientes métricas precisión global (ACC , accuracy), precisión (P), sensibilidad (S), valor F1, valor F1-macro, y áreas bajo la curva (AUC , area under the curve) de la curva ROC y la curva P-S. La matriz de confusión describe las predicciones de clase (representadas por columnas) *versus* las clases verdaderas (representadas por hileras). Para el caso binario (Cuadro 2) esta matriz reporta el número de verdaderos positivos (VP), observaciones positivas, predichas como positivas; el número de falsos positivos (FP), observaciones negativas predichas como positivas; el número de falsos negativos (FN), observaciones positivas predichas como negativas; y el número de verdaderos negativos (VN), observaciones negativas predichas como negativas.

Cuadro 2. Descripción de una matriz de confusión para el caso de un clasificador binario.

		Clases predichas	
		Positivo	Negativo
Clases verdaderas	Positivo	VP	FN
	Negativo	FP	VN

VP : verdadero positivo; FN : falso negativo; FP : falso positivo; VN : verdadero negativo.

ACC se define por:

$$ACC = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$$

P es la fracción de VP con respecto al total de positivos predichos y se calcula por:

$$P = \frac{VP}{VP + FP}$$

S es la fracción de VP con respecto al total de positivos observados y se define como:

$$S = \frac{VP}{VP + FN}$$

$F1$ representa la media armónica de P y S , esto es:

$$F1 = \frac{2PS}{P + S}$$

donde $F1$ toma valores entre 0 y 1; 0 indica un ajuste pobre y 1 un ajuste perfecto. La métrica $F1$ favorece a los clasificadores con P y S similares (Géron, 2019).

$F1$ -macro, en el caso de un problema multiclase, se calcula como el promedio aritmético de las medidas $F1$ obtenidas para cada clase:

$$F1 - macro = \frac{1}{N} \sum_i^N F1_i$$

donde $F1_i$ es el valor de $F1$ de la i -ésima clase objetivo; y N es el número total de clases. Esta métrica es apropiada cuando se tienen clases desbalanceadas; cada clase tiene el mismo peso y se hace énfasis en las clases con menor frecuencia (Lipton *et al.*, 2014).

La curva ROC asocia la tasa de VP en el eje vertical *versus* la tasa de FP en el eje horizontal. Para comparar el desempeño de los clasificadores se utiliza AUC , que varía entre 0 y 1, valores cercanos a 1 indican un buen desempeño del clasificador (Fawcett, 2006). En el caso de una clasificación binaria se tiene una curva ROC por modelo, y en el caso multiclase se tiene una curva ROC para cada clase del modelo. La curva P-S representa la gráfica de valores de S en el eje horizontal *versus* valores de P en el eje vertical. El valor AUC de la curva P-S toma valores entre 0 y 1, valores próximos a 1 indican un buen desempeño del modelo. En el caso binario, cuando los datos no están balanceados, la curva P-S es más apropiada para comparar el desempeño de los clasificadores (Saito y Rehmsmeier, 2017).

Entrenamiento de los clasificadores

Escalamiento de variables

El conjunto de datos (o características) de entrada se estandarizó antes de realizar el entrenamiento de los clasificadores LR, SVM y RF, con base en la expresión,

$$x_j' = \frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j}$$

donde x_j' es un vector de observaciones de la j -ésima característica de entrada, del conjunto de entrenamiento de n observaciones; μ_j es la media muestral de x_j' ; y σ_j es la desviación estándar muestral.

El escalamiento de las variables mejora el desempeño de los algoritmos de optimización. Los parámetros de escala μ_j y σ_j de cada característica j se aplican posteriormente para transformar las características del conjunto de prueba y evaluar el desempeño de los clasificadores.

Selección de hiperparámetros

La selección de hiperparámetros óptimos para cada clasificador se realizó por medio de una búsqueda en retícula y validación cruzada (CV) con particiones. Una partición aleatoria se utilizó con 1965 observaciones (80 %) del conjunto de datos de entrada. Para cada clasificador, se seleccionó la combinación de hiperparámetros que obtuvo el valor promedio máximo del criterio F1-macro, de las combinaciones posibles en cada retícula de hiperparámetros.

Los hiperparámetros e intervalos de valores analizados para cada clasificador se describen en el Cuadro 3. En particular, LR se entrenó con el inverso del hiperparámetro

Cuadro 3. Hiperparámetros e intervalos de valores, de los clasificadores de regresión logística (LR), máquina de soporte vectorial (SVM) y bosques aleatorios (RF).

Modelo	Hiperparámetro	Intervalo
LR	λ	0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000 y 10 000
	método	uno <i>versus</i> el resto y multinomial
SVM	Kernels	Lineal, sigmoide y rbf
	C	0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 y 1000
	γ	0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 y 1000 (kernels sigmoide y rbf)
RF	r	0, 1, 2, 3, 4, y 5 (kernel sigmoide)
	NE	100, 150, 200, 250, 300, 350, y 400
	CR	Entropía y Gini
	MC	Raíz cuadrada y logaritmo base 2
	MP	10, 15, 20, 25, y 30

NE: número de estimadores; CR: criterio de división; MC: número máximo de características; MP: profundidad máxima. Los intervalos de valores se seleccionaron en forma heurística y experimental.

de regularización L2, con dos estrategias de clasificación: uno *versus* el resto y multino-
mial; y se optimizó con el algoritmo L-BFGS-B (Morales y Nocedal, 2011).

Evaluación del desempeño de los modelos

La evaluación del desempeño final de los clasificadores LR, SVM y RF se realizó con los conjuntos de datos completos (2457 observaciones) y con el conjunto de variables o características de entrada retenido. El procedimiento CV se realizó con $k=5$ particiones aleatorias, estratificadas por las tres clases de rezago social para obtener las métricas de desempeño promedio. La capacidad predictiva de los tres clasificadores se evaluó con los mismos escenarios de entrada (categorías del SCIAN) y particiones aleatorias de los datos para evitar sesgos en la comparación de su desempeño en predicción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los escenarios de entrada de datos e hiperparámetros optimizados de los clasificadores fueron: LR (a nivel subsector, $\lambda=10$); SVM (a nivel subsector, kernel sigmoide, $C=100$, $r = 0$ y $\gamma = 0.0001$); y RF (a nivel subsector, entropía CR , $MP = 20$, $MC = \sqrt{96}$ y $NE = 250$). De acuerdo con los hiperparámetros de regularización L2 optimizados, LR requirió mayor regularización que SVM. De los cinco escenarios de entrada de datos analizados, el nivel de agregación subsector del SCIAN obtuvo el mejor desempeño en predicción en los tres modelos.

RF superó a LR y SVM con las métricas $F1$ -macro y ACC . RF superó a LR y SVM para P en las clases B y A; para S en la clase M y para $F1$ en las clases B y M. LR superó a SVM y RF para P en la clase M, y para S en la clase B. SVM superó a LR y RF para S y $F1$ en la clase A. Además, se observó que los tres modelos de clasificación tuvieron mejor desempeño para identificar la clase B (Cuadro 4). Para la clase de rezago social A, RF minimizó FP ($P=0.668$); es decir, RF obtuvo el mejor desempeño para predecir la clase A. Por su parte, SVM minimizó FN ($S = 0.616$); es decir, SVM identificó la mayor cantidad de clases A verdaderas.

Cuadro 4. Criterios de desempeño promedio en predicción de los clasificadores regresión logística (LR), máquina de soporte vectorial (SVM) y bosques aleatorios (RF) con validación cruzada ($k=5$).

Modelo	$F1$ -macro	ACC	Clase	P	S	$F1$
LR	0.709 +/- 0.028	0.732 +/- 0.016	B	0.839	0.786	0.812
			M	0.687	0.737	0.711
			A	0.617	0.595	0.606
SVM	0.708 +/- 0.024	0.728 +/- 0.016	B	0.836	0.777	0.805
			M	0.685	0.727	0.706
			A	0.612	0.616	0.614
RF	0.716 +/- 0.021	0.744 +/- 0.010	B	0.864	0.785	0.822
			M	0.679	0.789	0.730
			A	0.668	0.538	0.596

ACC : precisión global; clases objetivo de rezago social (bajo: B, medio: M, y alto: A); precisión (P); sensibilidad (S) y métrica $F1$.

Las curvas ROC para cada clase objetivo del clasificador RF muestran que el valor máximo de *AUC* correspondió a la clase B y el mínimo correspondió a la clase M; mientras que, las curvas P-S muestran que RF obtuvo mejor desempeño para clasificar la clase B y el menor desempeño se obtuvo con la clase A (Figura 1). La visión optimista de la curva ROC se atribuye a la distribución no uniforme de las tres clases de rezago social para evaluar el desempeño de los clasificadores. En este tipo de situaciones existen alternativas más robustas como la curva ROC concentrada, la curva de costos y la curva P-S, esta última opción se considera la más adecuada (Saito y Rehmsmeier, 2015). Otra forma de medir el desempeño del clasificador RF es por medio de la matriz de confusión normalizada, que describe la proporción de clases verdaderas dentro cada clase predicha; esta matriz muestra los porcentajes de observaciones que pertenecen a la clase predicha correctamente; estos son 78 %, 79 %, y 54 %, para las clases B, M, y A, respectivamente (Figura 2). Las clases M y B tuvieron mejor predicción que la clase A; muestras de la clase M se confundieron con la clase A. Las predicciones de las clases de rezago social del modelo RF a partir de UE agregadas a nivel subsector se utilizaron para realizar una comparación de la distribución geográfica a nivel municipal con las clases de rezago reportadas por Vargas-Chanes y Valdés-Cruz (2019). En los mapas se observa que la distribución geográfica de la clase B se localiza en su mayor parte en el norte de México y en ambos mapas las distribuciones son muy similares. La distribución de la clase M es muy similar en el centro y

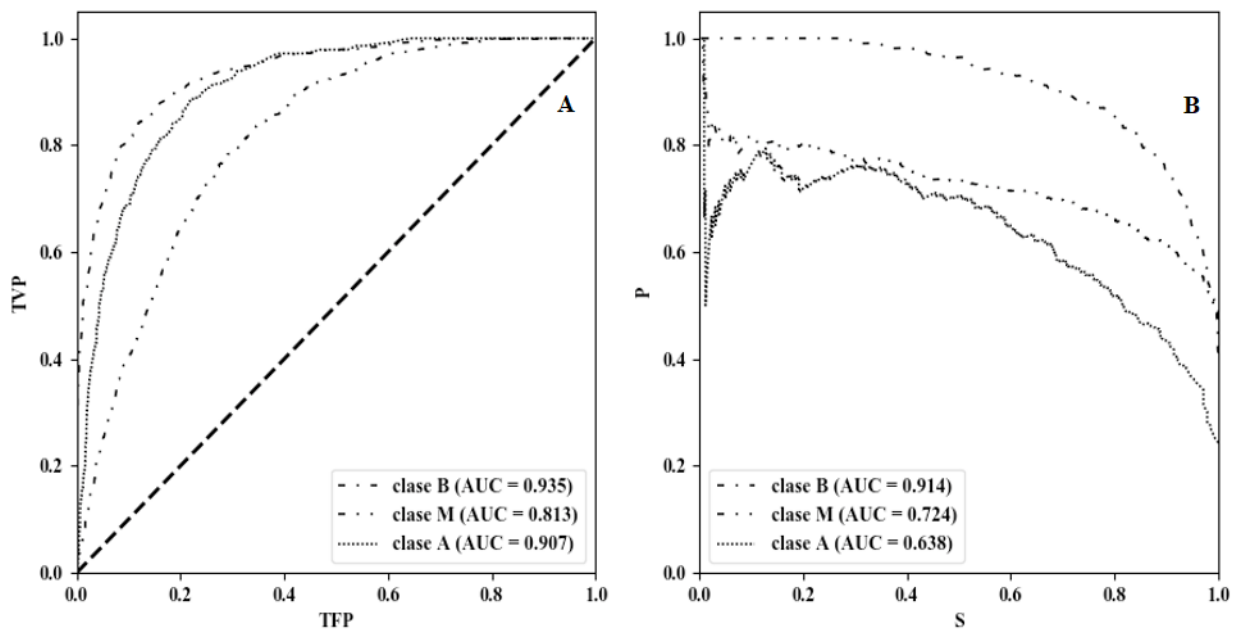


Figura 1. Curvas de desempeño del clasificador bosques aleatorios (RF) para predecir las clases de rezago social (bajo: B, medio: M, y alto: A) en México. A: curva ROC y B: curva P-S; precisión (P); sensibilidad (S); tasa de verdaderos positivos (TVP); tasa de falsos positivos (TFP); áreas bajo la curva ROC y curva P-S (AUC).

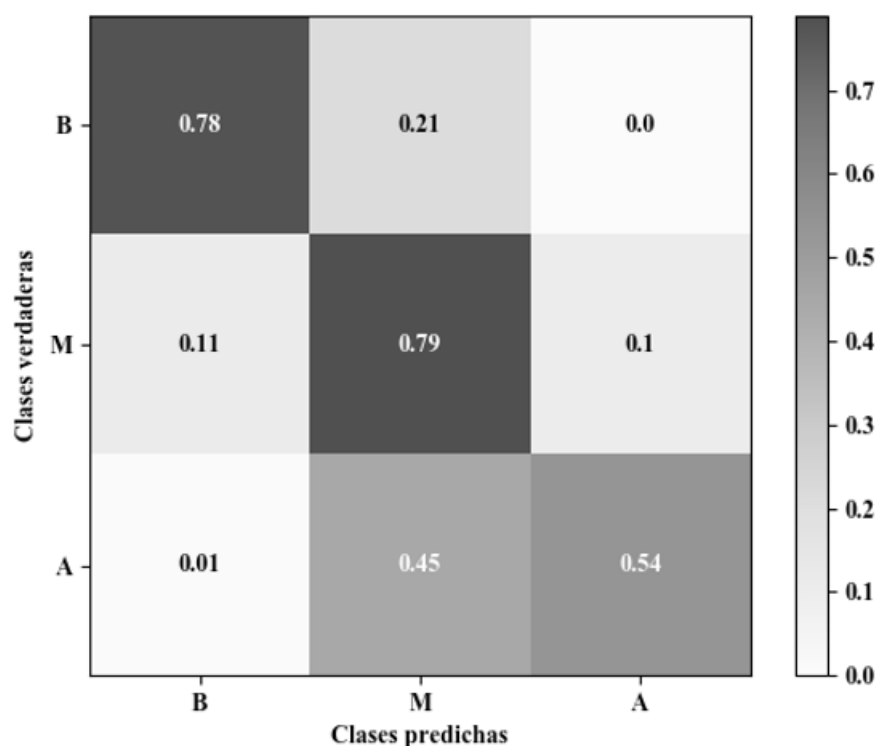


Figura 2. Matriz de confusión normalizada del clasificador bosques aleatorios (RF) para predecir las clases de rezago social (bajo: B, medio: M, y alto: A) en México.

sureste, y en el norte en algunos municipios, el modelo RF los clasifica como clase B o clase A. La distribución de la clase A es muy similar en el centro y sureste de México; sin embargo, en el norte, RF clasifica algunos municipios de clase A como clase M (Figura 3).

El modelo RF optimizado con datos de 2015 se utilizó para realizar las predicciones de los grados de rezago social a partir de UE de datos de octubre de 2016 y noviembre de 2017 del DENUE (Figura 4); donde se observa que la distribución geográfica de las clases de rezago social, es muy similar a la reportada por Vargas-Chanes y Valdés-Cruz (2019).

La aplicación del enfoque de aprendizaje automático propuesto en esta investigación para predecir el rezago social en México es un enfoque novedoso, viable, y de bajo costo; en particular, por el tipo de datos o variables de entrada utilizadas en el presente trabajo. Los resultados muestran que de 2015 a 2016, se presentó una disminución en la proporción de municipios con rezago social alto de 17.2 a 15.5 % (Cuadro 5); esto es, 42 municipios pasaron de un grado de rezago social alto a medio, en los municipios con rezago social bajo no se observaron cambios. Por otra parte, las predicciones para los años 2016 y 2017 muestran que los municipios con rezago social alto no variaron, y cinco municipios con rezago social medio en 2016 pasaron a un grado de rezago social

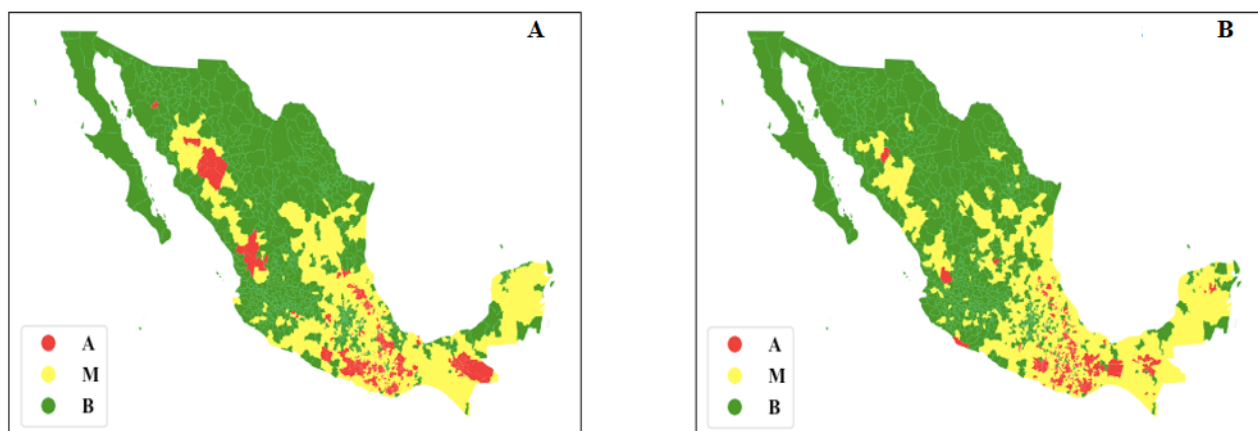


Figura 3. Distribución geográfica municipal de las clases de rezago social (bajo: B, medio: M, y alto: A) en 2015 en México. A. Valores reportados por Vargas-Chanes y Valdés-Cruz (2019) *versus* B. Predicciones realizadas con el clasificador bosques aleatorios (RF) a partir de datos de 2015, de unidades económicas agregadas a nivel subsector.

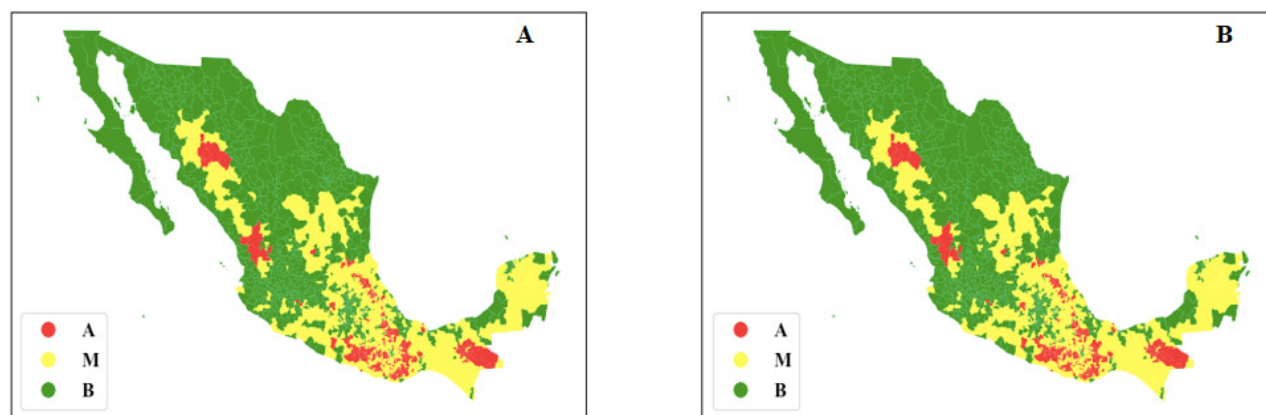


Figura 4. Distribución geográfica municipal de las clases de rezago social (bajo: B, medio: M, y alto: A) predichas con el clasificador bosques aleatorios (RF) en México. A: a partir de datos de unidades económicas (UE) de octubre de 2016; y B: UE de noviembre de 2017, agregadas a nivel subsector con base en datos del DENUE.

Cuadro 5. Número total de municipios (porcentajes) predichos con el modelo bosques aleatorios (RF) por categoría de rezago social (bajo: B, medio: M, y alto: A) en 2016 y 2017. El año 2015 muestra los datos de prueba del modelo RF.

Año	Total y porcentaje de municipios por clase de rezago social		
	B	M	A
2015	971 (39.5 %)	1064 (43.3 %)	422 (17.2 %)
2016	971 (39.5 %)	1106 (45.0 %)	380 (15.5 %)
2017	976 (39.7 %)	1101 (44.8 %)	380 (15.5 %)

bajo. La mayoría de los municipios no presentaron cambios en el grado de rezago social predicho, a pesar de que se utilizaron datos de dos años consecutivos del DENU como variables de entrada del modelo RF.

Los municipios que cambiaron su nivel de rezago social positivamente de 2016 a 2017, de acuerdo con el modelo RF son: Eduardo Neri, Guerrero; Comonfort, Guanajuato; El Marqués, Querétaro; Tapalpa, Jalisco; y Perote, Veracruz. Los municipios Eduardo Neri, Guerrero; Tapalpa, Jalisco; y Comonfort, Guanajuato tuvieron ligeros incrementos en UE en 2017, principalmente en aquellas UE relacionadas con el comercio al por menor. El municipio de El Marqués, Querétaro, aumentó de forma significativa el registro de las UE relacionadas con la construcción y la industria; lo cual se detectó por el modelo y predijo el cambio. Por último, el municipio de Perote, Veracruz, presentó cambios mixtos en los diferentes grados de rezago social a nivel subsector, por lo que se requiere un mayor análisis para explicar los cambios en la predicción del rezago social.

Con base en lo anterior, la metodología propuesta para predecir el grado de rezago social a partir de la información de UE obtuvo resultados similares a las metodologías tradicionales que utilizan datos de censos de población y vivienda, que resaltan la poca variación que se tiene en los niveles de rezago a nivel municipal en el lapso de tiempo analizado. En este contexto, la capacidad de los tomadores de decisiones responsables de mitigar el rezago social en México es limitada, en particular en las zonas de rezago social alto.

En este estudio no se consideró la naturaleza ordinal de los grados de rezago social para optimizar el desempeño de los clasificadores de aprendizaje automático. Como se ha mostrado en otros estudios (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2020) el desempeño de los clasificadores mejora, bajo el supuesto de una jerarquía equidistante entre las clases objetivo bajo investigación. Asimismo, es posible mejorar el desempeño de los clasificadores de aprendizaje automático para predecir una clase específica o categoría de rezago social de interés, esto permite determinar una métrica óptima para una clase específica (por ejemplo, el rezago social alto), en este caso, la métrica AUC de la curva de P-S para la clase A se utiliza como criterio de desempeño, en lugar de la métrica ACC utilizada en este estudio.

CONCLUSIONES

Los clasificadores de aprendizaje automático regresión logística, máquina de soporte vectorial y bosques aleatorios implementados en esta investigación obtuvieron un buen desempeño en predicción para predecir las clases o grados de rezago social (bajo: B, medio: M, y alto: A) a nivel municipal a partir de datos del directorio nacional de unidades económicas agregadas a nivel subsector (94 subsectores) y su localización geográfica.

En particular, el clasificador bosques aleatorios obtuvo el mejor desempeño promedio en predicción con una precisión global de clasificación de 74.4 % y F1-macro de 71.6 %. Las clases de rezago social bajo y medio se predijeron con mayor precisión que la clase

de rezago social alto. Los resultados del estudio muestran una fuerte correlación entre los grados de rezago social a nivel de municipios y los datos de las unidades económicas correspondientes.

La distribución geográfica de las clases de rezago social predicha en 2015 con el modelo bosques aleatorios a partir de unidades económicas fue muy similar a la distribución geográfica del rezago social reportada en 2015. Las predicciones del rezago social para 2016 y 2017 efectuadas con el enfoque propuesto muestran que es posible predecir el grado de rezago social de manera indirecta y con un costo bajo, cuando no se dispone de estadísticas de censos de población y vivienda para determinar el rezago social.

REFERENCIAS

- Alsharkawi A, Al-Fetyani M, Dawas M, Saadeh H, Alyaman M. 2021. Poverty classification using machine learning: the case of Jordan. *Sustainability*. 13: 1–16. <https://doi.org/10.3390/su13031412>
- Bishop CM. 2006. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer. New York, NY, USA. pp: 291–294.
- Breiman L. 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45: 5–32.
- Cao W, Mirjalili V, Raschka S. 2020. Rank consistent ordinal regression for neural networks with application to age estimation. *Pattern Recognition Letters* 140: 325–331.
- CONEVAL (Consejo Nacional para la Evaluación de la Política de Desarrollo Social). 2016. Índice de Rezago Social 2015. Presentación de Resultados. https://www.coneval.org.mx/Medicion/Documents/Indice_Rezago_Social_2015/Nota_Rezago_Social_2015_vf.pdf (Consulta: enero 2021).
- Cortes C, Vapnik V. 1995. Support-vector networks. *Machine Learning* 20: 273–297.
- Dalenius T, Hodges J. 1959. Minimum variance stratification. *Journal of the American Statistical Association* 54: 88–101.
- Engstrom R, Hersh J, Newhouse D. 2017. Poverty from Space: Using High-Resolution Satellite Imagery for Estimating Economic Well-Being. World Bank Policy Research Working Paper No. 8284. <https://ssrn.com/abstract=3090770> (Consulta: febrero 2021)
- Fawcett T. 2006 An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters* 27: 861–874.
- Géron A. 2019. *Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems* 2nd ed. O'Reilly Media. Sebastopol, CA, USA. pp: 60–66.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Sistema de Clasificación. Industrial de América del Norte, México SCIAN 2013. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/clasificadores/SCIAN/SCIAN_2013/702825051693.pdf (Consulta: enero 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Marco geoestadístico 2014 versión 6.2 (DENUE). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004386> (Consulta: enero 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Directorio Nacional de Unidades Económicas DENUE. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx> (Consulta: enero 2021).
- James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. 2013. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. Springer. New York, NY, USA. pp: 215–219.
- Lipton ZC, Elkan C, Naryanaswamy B. 2014. Optimal Thresholding of Classifiers to Maximize F1 Measure. In: Calders T, Esposito F, Hüllermeier E, Meo R. (eds) *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. ECML PKDD 2014. Lecture Notes in Computer Science* 8725. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44851-9_15
- McCullagh P, Nelder JA. 1989. *Generalized Linear Models*, volume 37 of *Monographs on Statistics and Applied Probability*. 2a Ed. Chapman and Hall. London, UK. 532 p.
- Morales JL, Nocedal J. 2011. Remark on „algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization“. *ACM Transactions on Mathematical Software* 38 (1): 1–4. <https://doi.org/10.1145/2049662.2049669>

- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V, Vanderplas J, Passos A, Cournapeau D, Brucher M, Perrot M, Duchesnay É. 2011. Scikit-learn: Machine learning in python. *Journal of Machine Learning Research* 12: 2825–2830.
- Pérez-Rodríguez P, Flores-Galarza S, Vaquera-Huerta H, Del Valle-Paniagua DH, Montesinos-López OA, Crossa J. 2020. Genome-based prediction of Bayesian linear and non-linear regression models for ordinal data. *Plant Genome* 13: 1–13. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20021>
- Powell LM, Slater S, Mirtcheva D, Bao Y, Chaloupka FJ. 2007. Food store availability and neighborhood characteristics in the United States. *Preventive Medicine* 44: 189–195.
- Raschka S, Mirjalili V. 2019. *Python Machine Learning* 3rd ed. Packt Publishing Ltd. Birmingham, UK. pp: 90–96.
- Saito T, Rehmsmeier M. 2015. The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets. *PLoS ONE* 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118432>
- Saito T, Rehmsmeier M. 2017. Precrec: fast and accurate precision–recall and ROC curve calculations in R. *Bioinformatics* 33: 145–147. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btw570>
- Sani NS, Rahman MA, Bakar AA, Sahran S, Sarim HM. 2018. Machine learning approach for bottom 40 percent households (B40) poverty classification. *International Journal on Advanced Science, Engineering, and Information Technology* 8: 1698–1705. <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.8.4-2.6829>
- Vargas-Chanes D, Valdés-Cruz S. 2019. A longitudinal study of social lag: regional inequalities of growth in Mexico 2000 to 2015. *Journal of Chinese Sociology* 6: 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40711-019-0100-6>
- Wang L, Zhu J, Zou H. 2006. The doubly regularized support vector machine. *Statistica Sinica* 16: 589–615.



HOLISTIC RISK INDEX FOR DECISION-MAKING IN MANAGEMENT OF RUST *Hemileia vastatrix* IN COFFEE PLANTATIONS IN HONDURAS

Carolina Reyes-Robles¹, Alejandro Moreno-Reséndez¹, José Luis Reyes-Carrillo¹,
Juan Francisco Barrera-Gaytán^{2*}, Ángel Trejo-Sosa³, Juan Rafael López-Dubón³

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez, Valle Verde, Torreón, Coahuila, Mexico. C. P. 27054.

² El Colegio de la Frontera Sur. Departamento Agricultura, Sociedad y Ambiente. Grupo Académico Ecología de Artrópodos y Manejo de Plagas. Carretera Antiguo Aeropuerto km 2.5, Tapachula, Chiapas, Mexico. C. P. 30700.

³ Instituto Hondureño del Café. Centro de Investigación y Capacitación Dr. Jesús Aguilar Paz. Aldea La Fe, Ilama, Santa Bárbara, Honduras, Centroamérica. C. P. 22101.

* Corresponding author: jbarrera@ecosur.mx

ABSTRACT

One of the diseases that most affect coffee plantations (*Coffea arabica*) is the fungus *Hemileia vastatrix*, which causes rust. The lack of a decision-making method with a holistic approach limits the effective management of this disease. Therefore, this study aimed to determine the Holistic Risk Index (HRI) for rust in coffee-growing zones of El Lago de Yojoa, El Paraíso and Olancho, Honduras. First, a participatory diagnosis of coffee industry was implemented; surveys were conducted to determine the socioeconomic status of 43 coffee producers, also their coffee farms were sampled. The diagnosis indicated that deficient management of the coffee plantations, the incidence of pests and a precarious economy for coffee growers were the most important problems. One threat variable (leaves with rust); three vulnerability variables (altitude, coffee variety and shade); and three response capacity variables (technification, harvesting and productive coffee trees) were identified. The HRI and resilience were related by means of a power equation and from that result the criteria for categories were determined. When comparing the three coffee-growing zones with a multivariate analysis of variance and a canonical discriminant analysis for the set of HRI component values, the El Paraíso coffee-growing zone was different from the Lago de Yojoa zone, but these two zones did not differ from the Olancho zone. The same result was found for the response capacity, where the harvest and technification variables had a greater influence in El Paraíso and the productive category variable of coffee trees was more important in Olancho. Finally, a work plan was proposed to reduce the risk and increase the resilience of producers to rust.

Keywords: coffee rust, *Coffea arabica*, vulnerability, response capacity, holistic approach, risk management.

Citation: Reyes-Robles C, Moreno-Reséndez A, Reyes-Carrillo JL, Barrera-Gaytán JF, Trejo-Sosa A, López-Dubón JR. 2022. Holistic risk index for decision-making in management of rust *Hemileia vastatrix* in coffee plantations in Honduras. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2770>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 19, 2021.
Approved: March 15, 2022.
Estimated publication date:
April 18, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 264-293.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCTION

Coffee (*Coffea arabica*) is grown in tropical and subtropical regions of the world, where it contributes to the household economy of millions of people who depend directly

and indirectly on the income generated by its cultivation, processing and marketing (ICO, 2015; 2020). Among the factors that limit the profits from the sale of coffee production, and that put the well-being of the producing families at risk, are various problems caused by pests (Krishnan *et al.*, 2021). For the purposes of this study, and taking into consideration the definition proposed by FAO (2019), we will understand by pest any plant or animal species, race or biotype or pathogenic agent harmful to plants or plant products.

One of the phytosanitary problems with the greatest negative impact on this crop is coffee rust caused by the fungus *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome. This fungus is a biotrophic parasite of coffee trees, among which the Arabica coffee varieties (*C. arabica*) are the most susceptible. Plants attacked by *H. vastatrix* decrease their production due to leaf loss, and some branches or the plant may even die as a consequence of the stress caused by this disease or by the action of other opportunistic plant pathogens (Avelino *et al.*, 2015). Following the devastating outbreak of this disease in Central America and Mexico in 2012, monetary losses were estimated at USD \$369.3 million in the 2012/13 cycle and USD \$245 million in the 2013/14 cycle (ICO, 2015). Therefore, the effective management of the diverse plant pathogens that affect the production and quality of coffee represents one of the most important challenges for this industry in the world. By harmoniously integrating the available control tactics, it is intended to prevent *H. vastatrix* from causing economic losses. For this purpose, the Integrated Pest Management (MIP) strategy uses action thresholds such as economic-injury level and economic threshold (Deguine *et al.*, 2021). But decision-making in pest management based on action thresholds neglects relevant social, economic and environmental aspects of the socio-environmental system. To address this deficiency, Holistic Pest Management (MHP), a pest management strategy based on a holistic approach to the socio-environmental system has proposed the Holistic Risk Index (HRI) as a decision-making tool (Barrera, 2020).

This index is based on social, economic, and environmental variables grouped into three components: threats (plant pathogen agents), vulnerability and the response capacity of producers and their production units. Other studies agree in pointing out the importance of the risk approach in decision-making to manage socio-environmental systems (Altieri and Nicholls, 2013; Montalba *et al.*, 2013; Gazzano *et al.*, 2015).

The results of this study are expected to identify the most vulnerable zones and contribute with risk and resilience criteria to the decision-making process of producers for rust management. The hypothesis proposed that decision-making based on risk and resilience would make it possible to identify the most vulnerable coffee-growing zones with the least capacity to respond to the threat posed by rust in order to guide zonal management actions. Therefore, the objective of the study was to determine the holistic risk index to *H. vastatrix* for coffee producers by identifying production and marketing problems, determining the components of the holistic risk index and estimating resilience to rust in three coffee-growing zones of Honduras.

MATERIALS AND METHODS

Zone and period of study

The study was carried out in coffee plantations of producers in three coffee-growing zones of Honduras, Central America: Central North or Lago de Yojoa zone, which included producers located in the departments of Cortés, Santa Bárbara and Comayagua; in the East zone, with producers from the department of El Paraíso; and in the Central East zone with producers from the department of Olancho. For identification purposes in this study, producers in Lago de Yojoa will be referred to as producers located in the Central North zone, producers in El Paraíso will be referred to as producers in the East zone and producers in Olancho will be referred to as producers in the Central East zone. Field activities and analysis were carried out from September 2016 to April 2017, in coordination with the Instituto Hondureño del Café (IHCAFÉ).

Problem identification

The study began with a diagnosis workshop in which 32 coffee producers participated. Using the “brainstorming” technique, the producers expressed verbally and in writing their main problems in coffee production and marketing. Afterwards, each producer was asked to write on a sheet of paper the 20 most important problems and to identify the ten with the highest importance and mention them in ascending order (1: most important, 10: least important). To identify the ten most important problems of the group of producers, the average number of points obtained for each problem prioritized at the individual level was calculated.

Interactions between variables

The ten most important needs (now converted into variables) were analysed by means of a structural analysis. This analysis allows us to understand the functioning of the system by establishing the degree of interdependence and the degree of influence (mobility) between the variables (Barrera *et al.*, 2013). As a result, by plotting the relationship between dependence (abscissae) with respect to mobility (ordinates), the four zones or zones of structural analysis were established in which the variables under study are distributed: autonomous zone (low interdependence, low mobility), power zone (low interdependence, high mobility), exit zone (high interdependence, low mobility) and conflict zone (high interdependence, high mobility).

Rapid Agroecological Sampling

The information was collected by Rapid Agroecological Sampling (RAS) according to the methodology described by Barrera (2020). The RAS consisted of a semi-structured interview with producers and a sampling of their coffee plantations. A total of 43 surveys were carried out because the sample consisted of 43 coffee plantations.

Interview with the producer

The semi-structured interview consisted of 47 questions to characterize the socioeconomic aspects of the producer (owner or manager) and his/her household such as age, sex, schooling, family composition, income, affiliation to an organization, level of interest in coffee cultivation, planting zones, varieties, planting density, agronomic management, shade trees, soil conservation, predominant pests, expected yield, coffee processing, coffee bean commercialization and production costs.

Sampling of the production unit

Location. A map of each farm or production unit was made and the geographic coordinates and altitude (m) were determined using an Android application.

Sampling area. Within the production unit an “internal plot” of 20 x 20 m was delimited to carry out the sampling of the coffee plantation.

Coffee and shade trees. The total number of coffee trees and shade trees in the internal plot was counted. For each of the shade trees, the species, height, and normal diameter were determined; normal diameter (at 1.3m high) was measured on trees with DN>5 cm. The presence/absence of epiphytes and parasitic plants on the shade trees was also determined.

Shade percentage. The percentage of shade (vegetation cover) in the inner plot was determined using the grid method. This method consisted of recording the number of coffee trees that were under a shade tree by sampling one coffee tree and another not.

Soil cover. The presence-absence of soil cover was recorded by empirical measurement with a fixed distance reference standard (the length of the shoe to the toe), known as the “toe of the shoe method”. The absence of vegetation was recorded by finding leaf litter and bare soil, while the presence of vegetation was identified as living vegetation or soil cover (weeds) in 30 points (separated every 5 m) located between the rows of coffee trees in the internal plot. The soil vegetation cover was classified into the following groups of weeds: grasses, annual and perennial broad-leaved plants and herbaceous vines between the rows of coffee trees or on the coffee trees.

Pests. The most common coffee pests were sampled using the integral count method. Sampling for insects (coffee berry borer, scales, mealy bugs, etc.) and plan pathogen fungi that cause rust, American leaf spot (*Mycena citricolor*), or anthracnose (*Colletotrichum* spp.), among others, was carried out on a branch in the middle third of each of 20 coffee trees in the internal plot. The percentage of infestation of each organism was calculated based on the number of fruits or leaves affected per branch. For stem borers (Carambycidae) and crickets (Gryllidae), the stems of coffee trees were also sampled.

Estimated harvest. To estimate the harvest, 25 coffee trees were chosen in the internal plot distributed in a 5 x 5 square of coffee trees. These coffee trees were determined for age, variety, plant height, stem thickness, number of axes (orthotropic branches), defoliation and number of coffee trees in production (category I, normal; category II, coffee trees requiring pruning). Afterwards, the fruits of a representative coffee tree of each of these two production categories were counted. The total number of fruits per internal plot was estimated by multiplying the number of fruits per category of coffee tree by the number of coffee trees in each category.

Producer characterization

The 43 producers participating in the study were characterized on the basis of the information from the surveys and the sampling of coffee plantations. For this purpose, the IHCAFÉ classification was used as a reference, which classifies producers into four groups based on the agronomic management of their coffee plantations during the year.

According to this categorization, the 43 producers who participated in this study were classified into four groups (Table 1). Of the producers 11.6 % were classified in group 1; 51.2 % in group 2; 20.9 % in group 3; and 16.3 % in group 4. Regarding the geographic location of the producers, 25.6 % were located in Olancho; 27.9 % in El Paraíso; and 46.5 % in Lago de Yojoa.

The plantations of the producers of Lago de Yojoa who participated in the study were located at an altitude between 684 and 1577 m; those of El Paraíso between 806 and 1300 m; and those of Olancho between 638 and 1500 m. Regarding coffee varieties, the producers of Lago de Yojoa participating in the study cultivated Lempira, IHCAFÉ 90,

Table 1. Categorization of coffee producers participating in the study according to agronomic management of the crop in Honduras, Central America (2016-2017).

Groups or categories and description of the main agronomic activities in the year	Study zones			Total
	Lago de Yojoa	El Paraíso	Olancho	
1. Weed control and no agrochemicals are applied.	3	1	1	5
2. Weed control and apply 1-2 soil fertilizations and apply a fungicide.	11	5	6	22
3. Weed control and apply a minimum of three soil fertilizations, fungicides and pruning.	4	3	2	9
4. Weed control and apply more than four soil fertilizations, apply fungicides, prune and use a comprehensive pest control and plant nutrition program.	2	3	2	7
Total	20	12	11	43

Catuaí, Parainema, Catimor, Bourbon, San Ramón, Villalobo and Pacas; in El Paraíso they cultivated Lempira, IHCAFÉ 90 and Parainema; and in Olancho Lempira and Parainema. The percentage of farmers growing only rust susceptible varieties was 70 % in El Lago de Yojoa, 70 % in El Paraíso and 100 % in Olancho.

Calculation of the Holistic Risk Index

Once the information from the interviews with producers and the sampling of production units was tabulated, the variables were classified according to the risk components (HRI): threat (A), vulnerability (V) and response capacity (C) (Table 2). Next, the cause-effect relationship was established between the variables classified as V and C compared to A (coffee rust). The variables of the three components were then standardized on a scale of 1 to 100. Once the variables were standardized, the value of each risk component was calculated by adding the individual values of the variables that made it up. Finally, the risk (HRI) of each producer ($n = 43$) to rust was calculated with the formula $HRI = (A + V) / C$ (Equation 1) (Barrera, 2020).

Analysis of the Holistic Risk Index

To contrast the risk values (HRI) between the coffee-growing zones under study (Lago de Yojoa, El Paraíso and Olancho), the analysis of variance (ANOVA) was applied, and

Table 2. Components and indicators of the holistic risk index (HRI) and its relationship with the pathogen causing coffee rust (*Hemileia vastatrix*) in Honduras.

Component. Indicators (variables)	Relation of factors (A, V, C) with rust incidence (%)
Threat (A). Percentage of leaves with rust (number of coffee leaves; incidence of rust).	Rust incidence: very low (0.1-4.9 %): A = 5 %; low (5.0 - 9.9 %): A = 20 %; medium (10.0 - 14.9 %): A = 30 %; high (15.0-19.9 %): A = 50 %; very high (≥ 20 %): A = 100 %.
Vulnerability (V). Altitude of the coffee plantation in meters above sea level (m).	Altitude: low (< 600 m): V = 50 %; medium (600 - 1000 m): V = 100 %; high (1001 - 1200 m): V = 75 %; very high (> 1200 m): V = 25 %.
Vulnerability (V). Variety [†] of coffee (rust susceptibility/tolerance ratio).	Coffee variety: susceptible: V = 100 %; moderately tolerant (mixture of susceptible and tolerant): V = 50 %; very tolerant: V = 0 %.
Vulnerability (V). % shade (number of coffee trees under shade).	Shade: none: V = 80 %; low: V = 40 %; medium: V = 20 %; very much: V = 100 %.
Response capacity (C). Degree of technification [‡] (agrochemicals, pruning).	Technification: low: C = 25 %; medium: C = 50 %; high: C = 75 %; very high: C = 100 %.
Response capacity (C). Difference between obtained and expected yield in quintals per manzana (Q per manzana [§]).	Yield: very poor (< -15 Q per manzana): C = 0 %; poor (-15 to < 0 Q per manzana): C = 25 %; equal (0 Q per manzana): C = 50 %; good (> 0 to ≤ 20 Q per manzana): C = 75 %; very good (> 20 Q per manzana): C = 100 %.
Response capacity (C). Productive categories [¶] (% of coffee trees I and II).	% I and II: none, C = 0 %; low: C = 25 %; regular: C = 50 %; high: C = 75 %; very high: C = 100 %.

[†]All varieties are of the species *Coffea arabica*. [‡]Technification corresponds to the categories in Table 1. [§]One quintal of green coffee (Q) is equivalent to 46 kg and one manzana is equivalent to 0.70 ha. [¶]In production category I the coffee trees are new, less than 10 years old, vigorous, leafy, well nourished, with abundant new and productive growth; their production is very good (more than 20 Q per manzana). Coffee trees in production category II are new trees less than 10 years old, with an abundance of branches that are not very vigorous or with signs of malnutrition; production is good but can be improved by pruning.

no significant difference was found, for this reason a multiple comparison test was not used. Then, the interaction between the risk components was analyzed by means of the Holistic Risk Triangle (HRT; the one THR proposed by Barrera, 2020). The HRT is a triangular graph whose sides are the risk components A: threat, V: vulnerability and C: response capacity, which are not independent. Therefore, with this *ad hoc* analysis this graph contains eight zones or zones representing different risk intensities, from very low to very high.

An analysis was also made by means of radial graphs to determine the relative importance of the variables within each risk component. The above analyses were carried out to establish comparisons between the three coffee growing zones; however, the ANOVA was only applied to the risk (HRI) and not to its components because they are not independent of each other.

Due to the existing correlation between the components (threat, vulnerability and response capacity), a multivariate analysis of variance (MANOVA) was applied to estimate the differences between the mean vectors of the coffee-growing zones (Lago de Yojoa, El Paraíso and Olancho). This parametric analysis was used to make a joint comparison of the components, and also to analyze each component separately when they were made up of more than one variable, as was the case for vulnerability and response capacity.

The MANOVA recorded a significant difference ($p \leq 0.05$), so a canonical discriminant analysis (CDA) was applied to observe the statistical differences between coffee-growing zones and the contribution of each variable to these differences. MANOVA calculations and plots were produced using R software (Friendly and Fox, 2021; R Core Team, 2021).

An analysis was also conducted to determine the resilience to rust of each producer's activities. For this purpose, an approximate estimate of resilience (E) was made, as an equivalent of response capacity from clearing C in Equation 1, as follows: $E \approx C = (A+V) / HRI$ (Equation 2); and the relationship was plotted graphically. Producer resilience E is distinguished by establishing the relationship between the risk index (HRI) and its response capacity (C) (Barrera, 2020).

RESULTS AND DISCUSSION

Identification of the problems that limit coffee industry in Honduras

According to the participatory diagnosis, the top 10 problems in order of importance that limited coffee production and marketing in coffee-growing zones of Honduras in 2016 were: 1) poor coffee plantation management; 2) high incidence of pests; 3) precarious producer economics; 4) lack of technical assistance from IHCAFÉ; 5) limited access to credit; 6) poor coffee drying and storage infrastructure; 7) low coffee prices; 8) low coffee quality; 9) pronounced climatic variation; and 10) producer disorganization. Unlike what has been reported by producers in Mexico (Chiapas), where the low price of coffee is usually the most important problem (Barrera *et al.*, 2004), in Honduras poor coffee plantation management was identified as the most important problem, while coffee price was ranked seventh.

The incidence of pests ranked second in importance, even one place above a precarious economy of the producer. This can be explained by the loss of resistance to *H. vastatrix* of the main coffee varieties grown in Honduras; such as the predominant variety (Lempira) which was identified as sensitive in 2015.

Both in Honduras (this study) and in Chiapas, Mexico (Barrera *et al.*, 2004), the lack of technical personnel and consequently of advice to producers ranked fourth and fifth in importance. Another issue whose importance was ranked similarly by producers in both countries was poor production organization, which ranked tenth (Honduras) and ninth (Chiapas, Mexico). Honduran producers identified problems related to coffee quality among the ten most important (sixth and eighth place), while for Chiapas coffeee-producers quality was not among the problems (Barrera *et al.*, 2004).

The difference in the problems reported by producers could be due to the fact that those studies were conducted at different times, in Mexico in 2004 and in Honduras in 2016. At that time, producers in both countries had just suffered very serious crises; in Honduras the rust infections (2012-2014) and in Mexico the impact of low international coffee prices (2000-2004). Despite this, this comparison made it possible to identify some coincidences in the overall coffee problem between these countries.

Interactions between problems

According to the structural analysis, the power zone has the most important problems because once solved they would have the capacity to contribute to the solution of other problems affecting coffee growers. These problems were related to coffee prices, producer organization and technical assistance (Figure 1). Therefore, a strategy to improve the welfare of producers should be based on solving the problems of the power zone.

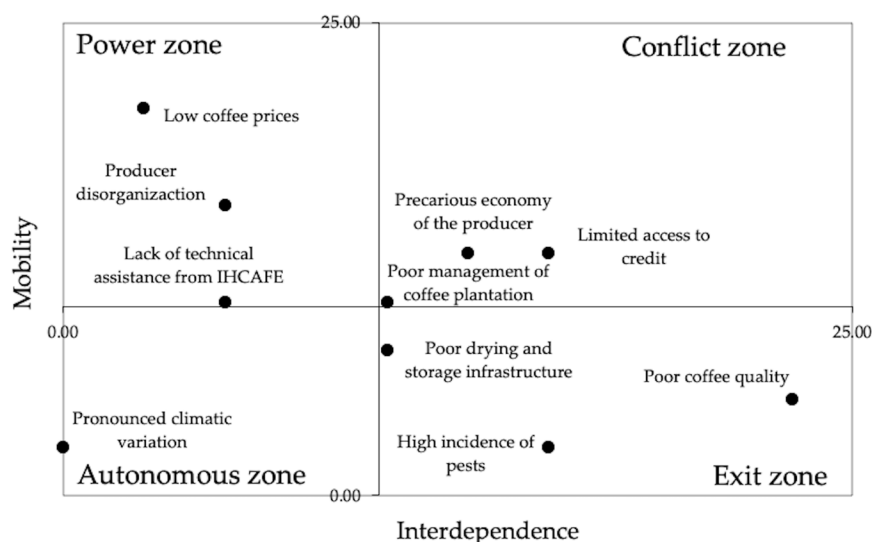


Figure 1. Structural analysis of the main problems that limit coffee production and commercialization in coffee-growing zones of Honduras (2016).

Other issues that deserve attention because once solved they could increase their contribution towards solving the whole problem were the precarious economy of the producer, the limited access to credit and the deficient management of the coffee plantation. However, these problems are located in the conflict zone (Figure 1), so that their solution becomes difficult because, according to the structural analysis, it is highly dependent on solutions to other problems in the system.

The incidence of crop pests, the second most important problem according to the participatory diagnosis with producers, is located in the exit zone of the structural analysis and has two characteristics that complicate solving (Figure 1). The first is that, due to a high level of interdependence, the solution of pest problems first requires solving other problems of the system. For example, once known the necessary resources to implement control methods or agronomic practices for coffee plantation management; and the second, which is perhaps even more important, refers to its low mobility, that is, the solution of pest problems contributes little to the solution of other problems of the system. Similar studies in Mexico have also found that pest problems were placed in the exit zone of the structural analysis (Barrera *et al.*, 2013), which confirms the opinion of Barrera (2020) that a pest management strategy that ignores or gives little importance to other elements of the socio-environmental system will not only have poor results in its management, but also its contribution to solving other problems will be very limited. According to the structural analysis (Figure 1), coffee quality and coffee drying and storage infrastructure were found to be in the same situation as pest problems.

On the other hand, and as it was expected, pronounced climate variability was located in the autonomy or autonomous zone of the structural problem analysis (Figure 1). That is, in the zone of those problems that, due to their low dependence and mobility respect to the other problems of the socio-environmental system, their solution is perceived as very difficult or impossible by the common people. Like that perception on the part of Mesoamerican coffee producers that “nothing can be done” to avoid the impact of extreme weather events (droughts, torrential rains) and the disasters they entail is documented in the literature (Eakin *et al.*, 2014).

Risk to rust

According to the HRT (Figure 2), the majority ($n = 31$, 72.1 %) of the 43 producers evaluated were located in the low risk zone for the threat posed by coffee rust; the remaining producers ($n = 12$) were located in the very low ($n = 2$, 4.7 %), medium ($n = 9$, 20.9 %) and high ($n = 1$, 2.3 %) risk zones.

In all cases, risk was more influenced by the vulnerability component ($V > 34.3$ %) than by the threat component ($A < 22.4$ %). In turn, the response capacity ranged from $C = 18.0$ % for the producer located at the highest risk ($HRI = 4.6$) to $C = 52.2$ % for the producer with the lowest risk ($HRI = 0.8$) (Figure 2, Table 3).

The averages and dispersion measures (standard error and width of the interval) of the values of the HRI and its components indicated high variability within each coffee-

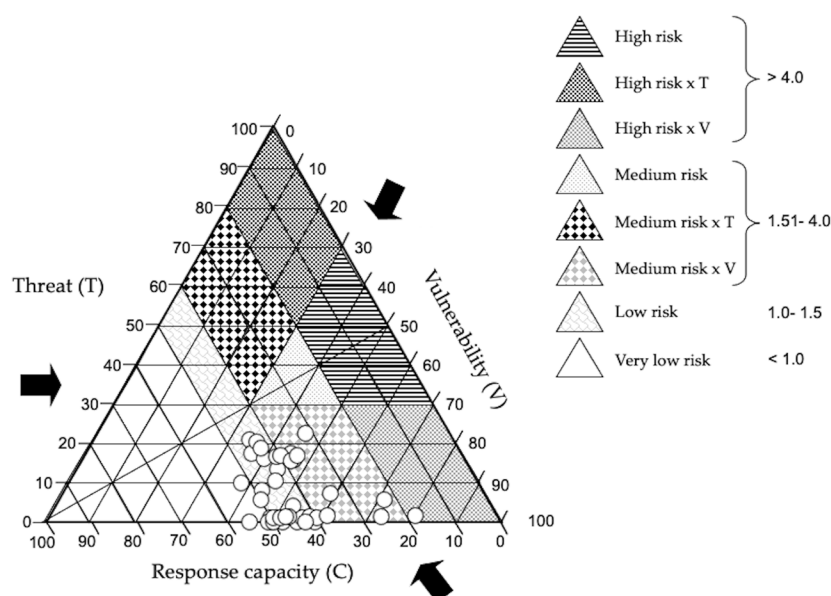


Figure 2. Holistic risk triangle for HRI components to rust (*Hemileia vastatrix*) from 43 coffee producers in Honduras (2016-2017).

growing zone, which could explain why the ANOVA showed no differences in the HRI when comparing the coffee-growing zones ($F = 1.765$, $gl = 2$, $p = 0.184$) (Table 3). When the risk components were broken down into their variables (Figure 3), it was observed that rust represented a greater threat (variable “infestation”) for producers

Table 3. Holistic Risk Index (HRI) for coffee rust (*Hemileia vastatrix*) and its components of 43 coffee producers in three coffee-growing zones of Honduras (2016-2017).

Average and measures of dispersion [†]	HRI and its components [‡]				Number of producers in HRI [§] category			
	A	V	C	HRI ^b	MB	B	M	A
Lago de Yojoa								
$\bar{x} \pm ee$ (%)	5.4 $\pm$ 1.6	53.9 $\pm$ 2.6	40.6 $\pm$ 2.2	1.7 $\pm$ 0.2a	1	14	4	1
Range (%)	0-22.4	34.3-80.5	18.0-55.2	0.8-4.6				
El Paraíso								
$\bar{x} \pm ee$ (%)	11.5 $\pm$ 2.2	44.1 $\pm$ 1.6	44.3 $\pm$ 1.2	1.3 $\pm$ 0.1a	0	10	2	0
Range (%)	0-20.2	36.3-52.9	37.5-50.1	1.0-1.7				
Olancho								
$\bar{x} \pm ee$ (%)	5.8 $\pm$ 2.2	49.5 $\pm$ 1.9	44.7 $\pm$ 1.8	1.3 $\pm$ 0.1a	1	7	3	0
Range (%)	0-16.8	38.2-61.2	36.2-52.1	0.9-1.8				
All study zones								
$\bar{x} \pm ee$ (%)	7.2 $\pm$ 1.2	50.1 $\pm$ 1.5	42.7 $\pm$ 1.2	1.5 $\pm$ 0.1	2	31	9	1
Range (%)	0-22.4	34.3-61.2	18.0-55.2	0.8-4.6				

[†] $\bar{x}$: average, ee: standard error; [‡]A: threat (rust), V: vulnerability, C: response capacity; [§]MB: very low, B: low, M: medium, A: high; ^bequal letters between zones of the HRI column indicate non-significant differences (ANOVA, $p > 0.05$).

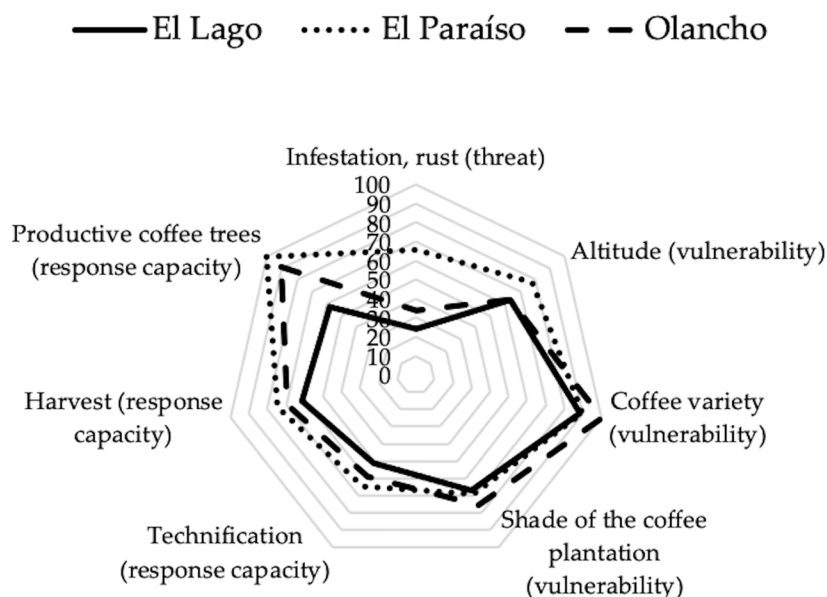


Figure 3. Comparison of the variables that integrate the components of the HRI against rust (*Hemileia vastatrix*) of 43 coffee producers in three coffee-growing zones of Honduras (2016-2017).

in El Paraíso (65.8 %) than for those in Olancho (33.6 %) or Lago de Yojoa (24.5 %). This could be explained in part by the fact that the coffee plantations of El Paraíso producers tended to be located at altitudes more vulnerable to this disease.

Although rust was less important for producers located in Lago de Yojoa, and the values of the vulnerability variables were similar to those of the other coffee-growing zones, the values of the response capacity variables of these producers tended to be lower, particularly in regard to the productive coffee trees variable (Figure 3).

On the other hand, the MANOVA applied to the three components of the HRI confirmed significant differences ($p < 0.003$) among the coffee-growing zones under study. According to the confidence circles (95 %) of the canonical discriminant analysis, the Olancho coffee zone was statistically equal to the El Paraíso and Lago de Yojoa zones, but the latter two were statistically different from each other (Figure 4A). The CDA also indicated that vulnerability and response capacity were more highly correlated with each other than either was with threat. Considering the length and orientation of the CDA arrows, it is observed that threat and response capacity were more important than vulnerability; in the case of farmers in El Paraíso, threat and response capacity were the most important constructs, while vulnerability and response capacity were the most important for farmers in Olancho (Figure 4A). In this analysis, the first canonical function (Can1) explained 91.9 % of the variability of the interaction.

On the other hand, the MANOVA applied separately to the vulnerability data revealed that there was no significant difference between coffee-growing zones

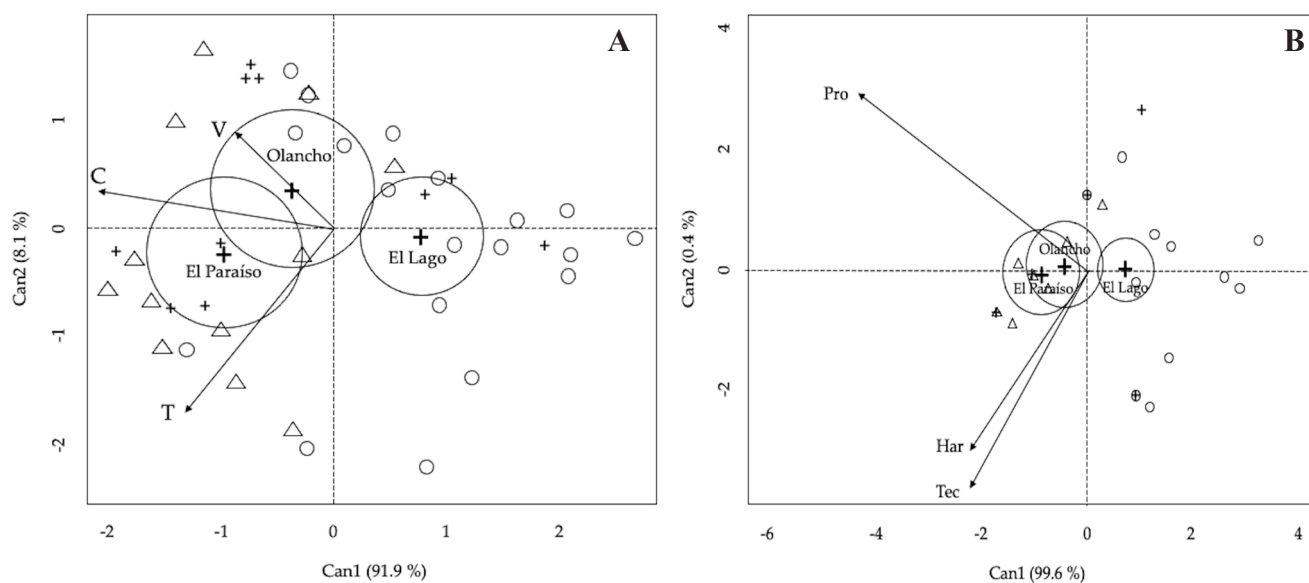


Figure 4. Comparison of the canonical discriminant structure of the components of the HRI (A) and the variables of the response capacity (B) of the coffee-growing zones of Lago de Yojoa (circle), El Paraíso (triangle) and Olancho (cross), Honduras. A: threat (rust), V: vulnerability, C: response capacity, Pro: productive categories of coffee trees (% I and II), Cos: difference between harvest obtained and expected, Tec: technification.

($p = 0.109$). However, this analysis applied to response capacity did detect significant differences between zones ($p \leq 0.015$). In this case, the confidence circles (95 %) of the CDA confirmed that the Olancho coffee zone was equal to the El Paraíso and Lago de Yojoa zones; there was also no significant difference between the latter two (Figure 4b). It was also observed that the variables “harvest” (Cos) and “technification” (Tec) were correlated, while the effect of these variables was less important than the effect of the variable “productive categories of coffee trees” (Pro). Furthermore, it was observed that the Cos and Tec variables were more influential in El Paraíso and the Pro variable was more important for Olancho (Figure 4B). The first canonical function (Can1) of this analysis explained 99.6 % of the variability of the interaction

Resilience to rust

The relationship of HRI to response capacity (C), considered an approximation for resilience (E), was fitted to a power equation with the coefficient b of negative value, i.e., resilience potentially decreased as the value of risk increased. For the whole data set corresponding to the 43 producers under study, the power equation was $E \approx C = 50.852 * HRI^{-0.637}$ ($R^2 = 0.99$).

With this equation, E values were obtained for HRI = 1.0, 1.5 and 4.0, risk values that correspond to the limits of the HRT zones (Figure 2), and with them, practical criteria were generated to determine the E categories (Table 4). According to these criteria, producers in Lago de Yojoa were less resilient because with HRI = 1.7 (Table 3) they

were in the medium resilience category ($E = 36.27$ for $HRI = 1.7$), while producers in El Paraíso and Olancho with $HRI = 1.3$ (Table 3) were in the high resilience category ($E = 43.01$ for $HRI = 1.3$).

A study conducted with coffee growers in Chiapas, Mexico, to estimate the risk to rust with variables different from those used in this research, found that the equation that described the HRI relationship with E was $E \approx C = 54.325 * HRI^{-0.817}$ ($R^2 = 0.98$) (Barrera, 2020). Therefore, it is confirmed that a nonlinear relationship of the power type is established between the HRI and E . On the other hand, it was observed that, although there are differences in the estimation of E between the Mexican equation and the one generated with Honduran producers, the differences were small. In particular, it was observed that both equations estimated practically the same E values from $HRI = 1.3$. It remains to be verified whether these equations can be used as a reference to estimate the resilience to rust of producers in other latitudes.

Work plan with risk management-based decision making

Based on the knowledge of the main elements (problems) and functioning of the socio-environmental coffee system of the producers participating in this study (Figure 1), and the definition of the criteria for managing the risk that the rust threat represented for this system (Table 4), based on Barrera (2020), a work plan was proposed to reduce the risk and increase the resilience of the system in the face of coffee rust. The plan established as a general objective the improvement of the producers' economy, since without economic resources they would not have the means to carry it out. To achieve the plan, the general objective was broken down into specific objectives and strategies based on the results of the structural analysis (Figure 1). Five specific objectives (variables of the exit and autonomous zones of the structural analysis) and four strategies (variables of the power and conflict zones) were proposed. In order to review the fulfillment of goals (risk reduction and increased resilience), the state of the system should be evaluated at the beginning of each coffee cycle.

The risk analysis suggests starting the implementation of the plan with the producers of Lago de Yojoa. In particular, efforts should be made to reduce the vulnerability arising

Table 4. Criteria to define the categories of (E) an approach to resilience, based on the holistic risk index (HRI) in coffee plantations threatened by coffee rust (*Hemileia vastatrix*) in Honduras.

Risk (HRI)		Resilience (E)	
Categories	Values [†]	Values	Categories [‡]
Very low	< 1.0	> 50.85	Very high
Low	1.0 - 1.5	39.28 - 50.85	High
Medium	> 1.5 - 4.0	21.03 - 39.27	Medium
High	> 4.0	< 21.03	Low

[†]Values corresponding to the boundaries of the zones in Figure 2;

[‡]Values calculated using equation $E \approx C = 50.852 * HRI^{-0.637}$

from the characteristics of coffee varieties and shade, and to increase the proportion of productive coffee trees (categories I and II) through the renovation of coffee plantations to improve yields. Secondly, the risk and resilience results indicate that producers in the coffee-growing zone of Olancho, whose plantations are cultivated only with coffee varieties susceptible to rust, should be attended to. As for the producers in the coffee-growing zone of El Paraíso, despite the higher levels of rust infestation, their response capacity was the best. In general, the results showed that the 43 farmers who participated in the study need to reduce vulnerability (coffee varieties and shade) and increase response capacity (technification to improve yield and crop quality).

CONCLUSIONS

The elements necessary for the functioning of the socio-environmental system of coffee production in agroecosystems in Honduras were identified. Criteria were also defined for managing the risk posed by coffee rust caused by the fungus *Hemileia vastatrix* to these agroecosystems.

With the information obtained, a work plan was designed as a proposal to reduce the risk and increase the resilience of the system to coffee rust, in order to improve the economy of the producers.

Finally, the most vulnerable coffee-growing zones with the least capacity to respond to the threat of rust were identified, which can be used to guide decision-making in the management of this disease.

ACKNOWLEDGMENTS

In particular, to the 43 coffee producers from Lago de Yojoa, El Paraíso and Olancho, Honduras who participated in this research. To the technical team of the Instituto Hondureño del Café (IHCAFÉ) and the professional practice students of the Centro Regional Universitario del Litoral Atlántico (CURLA), assigned to IHCAFÉ in 2016-2017, for their support in the field. To the technical team of El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) Tapachula Unit for their support in the training on Rapid Agroecological Sampling. To M.E. Javier Valle (ECOSUR) for his advice on data analyses. To the Programa de Posgrado de Ciencias en Producción Agropecuaria de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) Laguna Unit for funding travel and field materials. To the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) of Mexico for the scholarship for doctoral studies awarded to Carolina Reyes-Robles.

REFERENCES

- Altieri MA, Nicholls CI. 2013. Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología* 8 (1): 7–20.
- Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, Morales C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security* 7: 303–321. <http://dx.doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- Barrera JF. 2020. Beyond IPM: Introduction to the theory of Holistic Pest Management. Springer Nature: Switzerland. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-43370-3>
- Barrera JF, Gómez-Ruiz J, Parra-Vázquez MR, Mercado-Vidal G, Williams T. 2013. Análisis de problemas ocasionados por plagas del café bajo un enfoque holístico. *Entomología Mexicana* 12: 1128–1133.

- Barrera JF, Parra-V M, Herrera-H OB, Jarquín-G R, Pohlan J. 2004. Plan Estatal de Manejo Agroecológico del Café en Chiapas: Una Guía para una Cafecultura Sustentable. Comisión para el Desarrollo y Fomento del Café de Chiapas y El Colegio de la Frontera Sur. Tapachula, Chiapas, México. <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000041940> (Retrieved: November 2021).
- Deguine JP, Aubertot JN, Flor RJ, Lescourret F, Wyckhuys KAG, Ratnadass A. 2021. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 41: 38. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w>
- Eakin H, Tucker C, Castellanos E, Díaz R, Barrera JF, Morales H. 2014. Adaptation in a multi-stressor environment: Perceptions and responses to climatic and economic risks by coffee growers in Mesoamerica. *Environment, Development and Sustainability* 16: 123–139. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-013-9466-9>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2019. Glosario de Términos Fitosanitarios. Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias No. 5. Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/mc891s/mc891s.pdf> (Retrieved: February 2022).
- Friendly M, Fox J. 2021. Candisc: Visualizing generalized canonical discriminant and canonical correlation analysis. R package version 0.8-6. <https://CRAN.R-project.org/package=candisc> (Retrieved: November 2021).
- Gazzano I, Altieri MA, Achkar M, Burgueño J. 2015. Holistic Risk Index: A case study of cattle producers in the protected area of Farrapos Estuaries-Uruguay. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 39: 209–223. <http://dx.doi.org/10.1080/21683565.2014.967439>
- ICO (International Coffee Organization). 2015. Annual Review 2013-2014. Strengthening the global coffee sector through international cooperation. <http://www.ico.org/documents/cy2014-15/annual-review-2013-14-electronic-e.pdf> (Retrieved: June 2021).
- ICO (International Coffee Organization). 2020. The value of coffee. Sustainability, inclusiveness, and resilience of the coffee global value chain. Development report. ICO FR/01/19E. <https://www.internationalcoffeecouncil.com/cdr2020?lang=es> (Retrieved: July 2021).
- Krishnan S, Matsumoto T, Nagai C, Falconer J, Shriner S, Long J, Medrano JF, Vega FE. 2021. Vulnerability of coffee (*Coffea* spp.) genetic resources. *Genetic Resources and Crop Evolution* 68: 2691–2710. <http://dx.doi.org/10.1007/s10722-021-01217-1>
- Montalba R, García M, Altieri M, Fonseca F, Vieli L. 2013. Utilización del Índice Holístico de Riesgo (IHR) como medida de resiliencia socioecológica a condiciones de escasez de recursos hídricos. Aplicación en comunidades campesinas e indígenas de la Araucanía, Chile. *Agroecología* 8 (1): 63–70.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (Retrieved: November 2021).

ÍNDICE HOLÍSTICO DE RIESGO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL MANEJO DE LA ROYA (*Hemileia vastatrix*) EN CAFETALES DE HONDURAS

Carolina Reyes-Robles¹, Alejandro Moreno-Reséndez¹, José Luis Reyes-Carrillo¹, Juan Francisco Barrera-Gaytán^{2*}, Ángel Trejo-Sosa³, Juan Rafael López-Dubón³

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez, Valle Verde, Torreón, Coahuila, Mexico. C. P. 27054.

² El Colegio de la Frontera Sur. Departamento Agricultura, Sociedad y Ambiente. Grupo Académico Ecología de Artrópodos y Manejo de Plagas. Carretera Antiguo Aeropuerto km 2.5, Tapachula, Chiapas, Mexico. C. P. 30700.

³ Instituto Hondureño del Café. Centro de Investigación y Capacitación Dr. Jesús Aguilar Paz. Aldea La Fe, Ilama, Santa Bárbara, Honduras, Centroamérica. C. P. 22101.

* Autor para correspondencia: jbarraera@ecosur.mx

RESUMEN

Una de las enfermedades que más afectan al cultivo del café (*Coffea arabica*) es el hongo *Hemileia vastatrix* causante de la roya. La carencia de un método de toma de decisiones con enfoque holístico limita el manejo eficaz de esta enfermedad, por lo que en este estudio se planteó determinar el Índice Holístico de Riesgo (HRI) ante la roya en zonas cafetaleras de El Lago de Yojoa, El Paraíso y Olancho, Honduras. En primer lugar, se realizó un diagnóstico participativo de la cafecultura. Después, se aplicaron encuestas para conocer la condición socioeconómica de 43 productores y se hizo muestreo de sus fincas de café. El diagnóstico indicó que el manejo deficiente de los cafetales, la incidencia de plagas y una economía precaria del cafecultor fueron los problemas más importantes. Se identificó una variable de amenaza (hojas con roya), tres de vulnerabilidad (altitud, variedad de café y sombra) y tres de capacidad de respuesta (tecnificación, cosecha y cafetos productivos). El HRI y la resiliencia se relacionaron por medio de una ecuación de potencia y a partir de ella se determinaron los criterios para categorías. Al comparar las tres zonas cafetaleras con un análisis multivariado de la varianza y un análisis discriminante canónico para el conjunto de los valores de los componentes del HRI, la zona cafetalera de El Paraíso fue diferente a la zona del Lago de Yojoa, pero estas dos zonas no difirieron de la zona de Olancho. El mismo resultado se encontró para la capacidad de respuesta, donde las variables cosecha y tecnificación tuvieron mayor influencia en El Paraíso y la variable categoría productiva de cafetos fue más importante en Olancho. Por último, se propuso un plan de trabajo para reducir el riesgo e incrementar la resiliencia de los productores ante la roya.

Palabras clave: roya del café, *Coffea arabica*, vulnerabilidad, capacidad de respuesta, enfoque holístico, gestión del riesgo.

INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica*) se cultiva en regiones tropicales y subtropicales del mundo, en las cuales contribuye a la economía familiar de millones de personas que dependen di-

Citation: Reyes-Robles C, Moreno-Reséndez A, Reyes-Carrillo JL, Barrera-Gaytán JF, Trejo-Sosa A, López-Dubón JR. 2022. Holistic risk index for decision-making in management of rust *Hemileia vastatrix* in coffee plantations in Honduras. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2770>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 19, 2021.
Approved: March 15, 2022.
Estimated publication date:
April 18, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 264-293.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



recta e indirectamente de los ingresos que genera su cultivo, procesamiento y comercialización (ICO, 2015; 2020). Entre los factores que limitan las ganancias por la venta de la producción del café, y que ponen en riesgo el bienestar de las familias productoras, se encuentran diversos problemas ocasionados por plagas (Krishnan *et al.*, 2021). Para propósitos de este estudio, y tomando en consideración la definición propuesta por la FAO (2019), entenderemos por plaga a cualquier especie, raza o biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales.

Uno de los problemas fitosanitarios de mayor impacto negativo en este cultivo es la roya del café causada por el hongo *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome. Este hongo es un parásito biotrófico de los cafetos, entre los cuales las variedades Arabica del café (*C. arabica*) son las más susceptibles. Las plantas atacadas por *H. vastatrix* disminuyen su producción debido a la pérdida de hojas, e incluso, algunas ramas o la planta pueden morir como consecuencia del estrés que provoca esta enfermedad o por la acción de otros agentes fitopatógenos oportunistas (Avelino *et al.*, 2015). Tras el devastador brote de esta enfermedad en Centroamérica y México en 2012, se estimaron pérdidas monetarias de 369.3 millones de dólares estadounidenses en el ciclo 2012/13 y 245 millones de dólares en el ciclo 2013/14 (ICO, 2015). Por lo tanto, el manejo efectivo de los diversos agentes fitopatógenos que afectan la producción y calidad del café representa uno de los desafíos más importantes para esta industria en el mundo.

Al integrar de manera armoniosa las tácticas de control disponibles, se pretende evitar que *H. vastatrix* provoque pérdidas económicas. Para ello, la estrategia del Manejo Integrado de Plagas (MIP) utiliza umbrales de acción como el nivel de daño y umbral económicos (Deguine *et al.*, 2021). Pero la toma de decisiones en el manejo de plagas basada en umbrales de acción deja de lado aspectos sociales, económicos y ambientales relevantes del sistema socioambiental. Para subsanar esta deficiencia, el Manejo Holístico de Plagas (MHP), una estrategia de manejo de plagas basada en un enfoque holístico del sistema socioambiental ha propuesto el Índice Holístico de Riesgo (HRI) como herramienta de toma de decisiones (Barrera, 2020).

Dicho índice se obtiene a partir de variables sociales, económicas y ambientales agrupadas en tres componentes: las amenazas (agentes fitopatógenos), la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta de los productores y sus unidades de producción. Otros estudios coinciden en señalar la importancia del enfoque de riesgo en la toma de decisiones para manejar los sistemas socioambientales (Altieri y Nicholls, 2013; Montalba *et al.*, 2013; Gazzano *et al.*, 2015).

Con los resultados de este estudio se espera identificar las zonas más vulnerables y contribuir con criterios de riesgo y resiliencia a la toma de decisiones de los productores para el manejo de la roya. La hipótesis planteó que la toma de decisiones basada en riesgo y resiliencia permitiría identificar las zonas cafetaleras más vulnerables y con capacidad de respuesta menor hacia la amenaza que representa la roya para orientar las acciones de manejo zonales. Por lo tanto, el objetivo del estudio fue determinar el índice holístico de riesgo ante *H. vastatrix* para productores de café, a través de identificar los problemas de la producción y comercialización, determinar los componentes

del índice holístico de riesgo y estimar la resiliencia ante la roya en tres zonas cafetaleras de Honduras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona y periodo de estudio

El estudio se realizó en cafetales de productores de tres zonas cafetaleras de Honduras, Centroamérica: zona Centro Norte o zona del Lago de Yojoa, que comprendió productores ubicados en los departamentos de Cortés, Santa Bárbara y Comayagua; zona Oriente con productores del departamento de El Paraíso; y zona Centro Oriente con productores del departamento de Olancho. Para fines de identificación en este estudio, se llamará productores del Lago de Yojoa a los productores ubicados en la zona Centro Norte, productores de El Paraíso a los de la zona Oriente y productores de Olancho a los de la zona Centro Oriente. Las actividades en campo y el análisis se llevaron a cabo de septiembre de 2016 a abril de 2017, en coordinación con el Instituto Hondureño del Café (IHCAFÉ).

Identificación de los problemas

El estudio inició con un taller diagnóstico en el que participaron 32 productores de café. A través de la técnica “lluvia de ideas” los productores expresaron en forma verbal y escrita sus principales problemas en la producción y comercialización del café. Después, a cada productor se le pidió que escribiera en una hoja de papel los 20 problemas más importantes y que identificara los diez con importancia mayor y los mencionara en orden ascendente (1: más importante, 10: menos importante). Para identificar los diez problemas más importantes del grupo de productores se calculó el promedio de puntos obtenido por cada problema priorizado a nivel individual.

Interacciones entre variables

Las diez necesidades (ahora convertidas en variables) más importantes se analizaron por medio de un análisis estructural. Este análisis permite conocer el funcionamiento del sistema a partir de establecer el grado de interdependencia (dependencia) y el grado de influencia (motricidad) entre las variables (Barrera *et al.*, 2013). Como consecuencia, a través de graficar la relación entre la dependencia (abscisas) con respecto a la motricidad (ordenadas), se establecieron las cuatro áreas o zonas del análisis estructural en las cuales se distribuyen las variables bajo estudio: zona autónoma (baja dependencia, baja motricidad), zona de poder (baja dependencia, alta motricidad), zona de salida (alta dependencia, baja motricidad) y zona de conflicto (alta dependencia, alta motricidad).

Muestreo Agroecológico Rápido

La información se levantó por Muestreo Agroecológico Rápido (MAR) de acuerdo con la metodología descrita por Barrera (2020). El MAR consistió en una entrevista semiestructurada a productores y un muestreo de sus cafetales. En total, se realizaron 43 encuestas porque la muestra se integró con 43 cafetales.

Entrevista al productor

La entrevista semiestructurada consistió en 47 preguntas para caracterizar los aspectos socioeconómicos del productor (dueño o encargado) y su hogar como la edad, sexo, escolaridad, composición de la familia, ingresos, afiliación a una organización, nivel de interés en el cultivo de café, áreas de siembra, variedades, densidad de siembra, manejo agronómico, árboles de sombra, conservación de suelos, plagas predominantes, rendimiento esperado, beneficiado o procesamiento del café, comercialización del grano y costos de producción.

Muestreo de la unidad de producción

Ubicación. Se hizo un croquis de cada predio o unidad de producción y con una aplicación para Andorid se determinaron las coordenadas geográficas y la altitud (m).

Área de muestreo. Dentro de la unidad de producción se delimitó una “parcela interna” de 20 x 20 m para realizar el muestreo del cafetal.

Cafetos y árboles de sombra. Se contó el total de cafetos y árboles de sombra en la parcela interna. De cada uno de los árboles de sombra se determinó la especie, la altura y el diámetro del tallo a la altura del pecho (DAP) de los árboles con DAP>5 cm. También se determinó la presencia/ ausencia de epífitas y plantas parásitas sobre los árboles de sombra.

Porcentaje de sombra. Se determinó el porcentaje de sombra (cobertura vegetal) en la parcela interna con el método de la cuadrícula. Este método consistió en registrar el número de cafetos que se encontraban bajo un árbol de sombra muestreando un cafeto sí, y otro no.

Cobertura del suelo. El registro de presencia-ausencia de cobertura del suelo se realizó a través de medición empírica con un patrón de referencia de distancia fijo (la punta del calzado), conocido como “método de punta del zapato”. La ausencia de vegetación se registró al encontrar hojarasca y suelo desnudo, en tanto que la presencia fue identificada como la vegetación viva o cobertura vegetal del suelo (arvenses o maleza) en 30 puntos (separados cada 5 m) ubicados entre las hileras de los cafetos de la parcela interna. La cobertura vegetal del suelo se clasificó en los grupos de arvenses siguientes: zacates, plantas anuales y perennes de hoja ancha y los bejucos entre las hileras de cafetos o sobre los cafetos.

Plagas. Se hizo un muestreo de las plagas más comunes del café con el método del recuento integral. El muestreo de insectos (broca, escamas, piojo harinoso, etc.) y hongos fitopatógenos causantes de roya, ojo de gallo (*Mycena citricolor*), o antracnosis (*Colletotrichum* spp.), entre otros, se realizó en una rama del tercio medio de cada uno de 20

cafetos de la parcela interna. El porcentaje de infestación de cada organismo se calculó con base en el número de frutos u hojas afectados por rama. Para el caso de barrenadores (Cerambycidae) y grillos (Gryllidae), también se muestreó el tallo de los cafetos. **Estimación de la cosecha.** Para estimar la cosecha se eligieron 25 cafetos en la parcela interna distribuidos en un cuadro de 5 x 5 cafetos. A estos cafetos se les determinó edad, variedad, altura de planta, grosor del tallo, número de ejes (ramas ortotrópicas), defoliación y número de cafetos en producción (categoría I, normales; categoría II, cafetos que requerían poda). Después, se contaron los frutos de un cafeto representativo de cada una de estas dos categorías productivas. El número total de frutos por parcela interna se estimó multiplicando el número de frutos por categoría de cafeto por el número de cafetos de cada categoría.

Caracterización de productores

Los 43 productores participantes en el estudio se caracterizaron a partir de la información procedente de las encuestas y los muestreos de cafetales. Para ello, se tomó de referencia la clasificación del IHCAFÉ, la cual clasifica a los productores en cuatro grupos con base en el manejo agronómico de su cafetal en el año.

De acuerdo con esta categorización, los 43 productores que participaron en este estudio se clasificaron en cuatro grupos (Cuadro 1). El 11.6 % de los productores se clasificó en el grupo 1; el 51.2 % en el grupo 2; el 20.9 % en el grupo 3; y el 16.3 % en el grupo 4. Respecto a la ubicación geográfica de los productores, el 25.6 % se ubicó en Olancho; el 27.9 % en El Paraíso; y el 46.5 % en el Lago de Yojoa.

Las plantaciones de los productores del Lago de Yojoa que participaron en el estudio se ubicaron a una altitud entre los 684 y 1577 m; las de El Paraíso entre 806 y 1300 m; y

Cuadro 1. Categorización de los productores de café participantes en el estudio según el manejo agronómico del cultivo en Honduras, C. A. 2016-2017.

Grupos o categorías y descripción de las principales actividades agronómicas en el año	Zonas de estudio			Total
	Lago de Yojoa	El Paraíso	Olancho	
1. Control de maleza y no aplica ningún tipo de agroquímico.	3	1	1	5
2. Control de maleza, aplica de 1-2 fertilizaciones y aplica un fungicida.	11	5	6	22
3. Control de maleza, aplica mínimo tres fertilizaciones, aplica fungicidas y hace podas.	4	3	2	9
4. Control de maleza, aplica más de cuatro fertilizaciones, aplica fungicidas, hace podas y usa un programa integral de control de plagas y nutrición de la planta.	2	3	2	7
Total	20	12	11	43

las de Olancho entre 638 y 1500 m. Respecto a las variedades de café, los productores del Lago de Yojoa participantes en la investigación cultivaban Lempira, IHCAFÉ 90, Catuai, Parainema, Catimor, Bourbon, San Ramón, Villalobo y Pacas; en El Paraíso se cultivaban Lempira, IHCAFÉ 90 y Parainema; y en Olancho Lempira y Parainema. El porcentaje de productores que cultivaban solo variedades susceptibles a la roya fue 70 % en El Lago de Yojoa, 70 % en El Paraíso y 100 % en Olancho.

Cálculo del Índice Holístico de Riesgo

Una vez tabulada la información de las entrevistas a los productores y el muestreo de las unidades de producción, las variables se clasificaron de acuerdo a los componentes del riesgo (HRI): amenaza (A), vulnerabilidad (V) y capacidad de respuesta (C) (Cuadro 2). Enseguida, se estableció la relación causa-efecto entre las variables clasificadas en V y C con respecto a A (roya del café). Después, las variables de los tres componentes se estandarizaron en una escala de 1 a 100. Una vez estandarizadas las variables, el valor de cada componente del riesgo se calculó por medio de la suma de los valores individuales de las variables que lo integraron. Por último, el riesgo (HRI) de cada productor ($n = 43$) a la roya se calculó con la fórmula $HRI = (A + V) / C$ (Ecuación 1) (Barrera, 2020).

Cuadro 2. Componentes e indicadores del índice holístico de riesgo (IHR) y su relación con el patógeno causante de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*).

Componente. Indicadores (variables)	Relación de factores (A, V, C) con la incidencia de la roya (%)
Amenaza (A). Porcentaje de hojas con roya (número de hojas de café; incidencia de roya).	Incidencia de roya: muy baja (0.1-4.9 %): A = 5 %; baja (5.0 - 9.9 %): A = 20 %; media (10.0 - 14.9 %): A = 30 %; alta (15.0-19.9 %): A = 50%; muy alta (≥ 20 %): A = 100 %.
Vulnerabilidad (V). Altitud del predio en metros sobre el nivel del mar (m).	Altitud: baja (< 600 m): V = 50 %; media (600 - 1000 m): V = 100 %; alta (1001 - 1200 m): V = 75 %; muy alta (> 1200 m): V = 25 %.
Vulnerabilidad (V). Variedad [†] de café (razón susceptibilidad/ tolerancia).	Variedad de café: susceptible: V = 100 %; medianamente tolerante (mezcla de susceptibles y tolerantes): V = 50 %; muy tolerante: V = 0 %.
Vulnerabilidad (V). % de sombra (número de cafetos bajo sombra).	Sombra: no hay: V = 80 %; poca: V = 40 %; media: V = 20 %; mucha: V = 100 %.
Capacidad de respuesta (C). Grado de tecnificación [‡] (agroquímicos, poda).	Tecnificación: baja: C = 25 %; media: C = 50 %; alta: C = 75 %; muy alta: C = 100 %.
Capacidad de respuesta (C). Diferencia entre rendimiento obtenido y esperado en quintales por manzana (Q por manzana [§]).	Rendimiento: muy malo (< -15 Q por manzana): C = 0 %; malo (-15 a < 0 Q por manzana): C = 25 %; igual (0 Q por manzana): C = 50 %; bueno (> 0 a ≤ 20 Q por manzana): C = 75 %; muy bueno (> 20 Q por manzana): C = 100 %.
Capacidad de respuesta (C). Categorías productivas ^b (% de cafetos I y II).	% I y II: no hay, C = 0 %; baja: C = 25 %; regular: C = 50 %; alta: C = 75 %; muy alta: C = 100 %.

[†]Todas las variedades son de la especie *Coffea arabica*. [‡]La tecnificación corresponde a las categorías en el Cuadro 1.

[§]Un quintal de café verde (Q) equivale a 46 kg y una manzana equivale a 0.70 ha. ^bEn la categoría productiva I los cafetos son nuevos, con menos de 10 años, vigorosos, frondosos, bien nutridos, con abundantes crecimientos nuevos y productivos; su producción es muy buena (más de 20 Q por manzana). Los cafetos de categoría productiva II son cafetos nuevos con menos de 10 años, abundancia de ramas poco vigorosas o con principios de desnutrición; la producción es buena, pero puede mejorarse al aplicar podas.

Análisis del Índice Holístico de Riesgo

Para contrastar los valores de riesgo (HRI) entre las zonas cafetaleras bajo estudio (Lago de Yojoa, El Paraíso y Olancho) se aplicó análisis de varianza (ANOVA) y no se encontró diferencia significativa, por esta razón no se utilizó prueba múltiple de comparación de medias. Entonces, la interacción entre los componentes del riesgo se analizó por medio del Triángulo Holístico de Riesgo (HRT) propuesto por Barrera (2020). El HRT es una gráfica triangular cuyos lados son los componentes del riesgo A: amenaza, V: vulnerabilidad y C: capacidad de respuesta, los cuales no son independientes. Por lo tanto, con este análisis *ad hoc* esta gráfica contiene ocho zonas o áreas que representan intensidades del riesgo diferentes, desde muy bajo hasta muy alto. También se hizo un análisis por medio de gráficos radiales para determinar la importancia relativa de las variables al interior de cada componente del riesgo. Los análisis anteriores se realizaron para establecer comparaciones entre las tres zonas cafetaleras. El ANOVA solo se aplicó al riesgo (HRI) y no a sus componentes porque no son independientes entre sí.

Debido a la correlación existente entre los componentes (amenaza, vulnerabilidad y capacidad de respuesta) se les aplicó un análisis multivariado de la varianza (MANOVA) para estimar las diferencias entre los vectores de medias de las zonas cafetaleras (Lago de Yojoa, El Paraíso y Olancho). Este análisis paramétrico se usó para hacer una comparación conjunta de los componentes, y también para analizar cada componente por separado cuando éstos estuvieron integrados por más de una variable, como fueron los casos de la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta.

El MANOVA registró una diferencia significativa ($p \leq 0.05$), por eso se aplicó un análisis discriminante canónico (CDA) para observar las diferencias estadísticas entre las zonas cafetaleras y la contribución de cada variable sobre estas diferencias. Los cálculos y gráficas del MANOVA se elaboraron con el software R (Friendly y Fox, 2021; R Core Team, 2021).

También se hizo un análisis para determinar la resiliencia de cada productor respecto a sus actividades ante la roya. Para ello, se hizo una estimación aproximada de la resiliencia (E), como equivalente de la capacidad de respuesta a partir de despejar C en la Ecuación 1, de la siguiente manera: $E \approx C = (A+V) / HRI$ (Ecuación 2); y se representó la relación gráficamente. La resiliencia del productor, E se distingue al establecer la relación entre el índice de riesgo (HRI) y su capacidad de respuesta (C) (Barrera, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de los problemas que limitan la cafeticultura en Honduras

De acuerdo con el diagnóstico participativo, los 10 principales problemas en orden de importancia que limitaban la producción y comercialización del café en zonas cafetales de Honduras en 2016 fueron: 1) manejo deficiente del cafetal; 2) alta incidencia de plagas; 3) economía precaria del productor; 4) falta de asistencia técnica del IHCAFÉ; 5) acceso limitado a crédito; 6) infraestructura deficiente de secado y almacenamiento del café; 7) precios bajos del café; 8) baja calidad del café; 9) variación climática

pronunciada; y 10) desorganización de productores. A diferencia de lo reportado por productores en México (Chiapas), donde el precio bajo del café suele ser el problema más importante (Barrera *et al.*, 2004), en Honduras el manejo deficiente del cafetal fue identificado como el problema más importante, mientras que el precio del café se ubicó en séptimo lugar.

La incidencia de plagas ocupó el segundo lugar en importancia, incluso un lugar arriba de una economía precaria del productor. Esto se puede explicar por la pérdida de resistencia a *H. vastatrix* de las principales variedades de café cultivadas en Honduras; como la variedad predominante (Lempira) la cual se identificó como sensible en 2015. Tanto en Honduras (este estudio) como en Chiapas, México (Barrera *et al.*, 2004), la falta de personal técnico y por lo tanto de asesoramiento a los productores se ubicó en el cuarto y quinto lugar de importancia. Otro problema cuya importancia se catalogó de manera similar por los productores en ambos países fue la mala organización de la producción, la cual se ubicó en décimo (Honduras) y noveno (Chiapas, México) lugar. Los productores hondureños identificaron problemas relacionados con la calidad del café entre los diez más importantes (sexto y octavo lugar), en tanto que para los productores de Chiapas la calidad no figuró entre los problemas (Barrera *et al.*, 2004). La diferencia en los problemas señalados por los productores pudo deberse a que estos estudios se realizaron en momentos diferentes, en México en 2004 y en Honduras en 2016. Entonces, los productores en ambos países acababan de sufrir crisis muy graves; en Honduras las infecciones de roya (2012-2014) y en México el impacto de los bajos precios internacionales del café (2000-2004). A pesar de ello, esta comparación permitió identificar algunas coincidencias en el problema total del café entre estos países.

Interacciones entre problemas

De acuerdo con el análisis estructural, en la zona de poder existen problemas más importantes porque una vez resueltos tendrían capacidad de contribuir con la solución de otros problemas de los productores de café. Estos problemas estuvieron relacionados con el precio del café, la organización de los productores y la asistencia técnica (Figura 1). Por lo tanto, una estrategia de mejora del bienestar de los productores debería basarse en la solución de los problemas de la zona de poder.

Otros problemas que merecen atención porque una vez resueltos podrían aumentar su contribución hacia resolver el problema completo fueron: la economía precaria del productor, el acceso limitado al crédito y el manejo deficiente del cafetal. Sin embargo, estos problemas se sitúan en la zona de conflicto (Figura 1), de modo que su solución se torna difícil porque según el análisis estructural, depende mucho de otras soluciones a problemas del sistema.

La incidencia de plagas del cultivo, el segundo problema en importancia según el diagnóstico participativo con productores, por ubicarse en la zona de salida del análisis estructural presenta dos características que complican su solución (Figura 1). La primera, es que, por su alto nivel de dependencia, la solución de los problemas de plagas requiere solucionar primero otros problemas del sistema como, por ejemplo, dis-

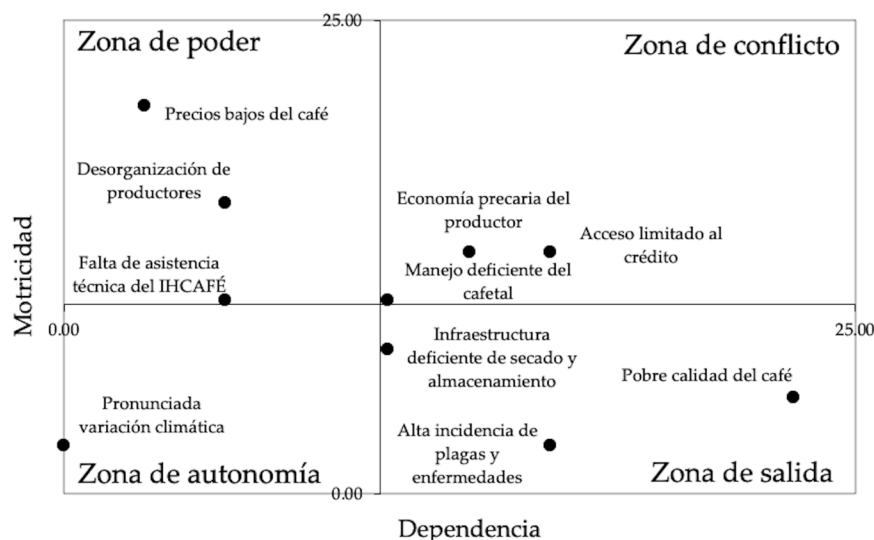


Figura 1. Análisis estructural de los principales problemas que limitan la producción y comercialización del café en zonas cafetaleras de Honduras (2016).

poner de los recursos necesarios para implementar métodos de control o las prácticas agronómicas del manejo de cafetal; y, la segunda, que tal vez es aún más importante, se refiere a su baja motricidad, es decir, que la solución de los problemas de plagas contribuye poco a solucionar otros problemas del sistema. Estudios similares realizados en México también han encontrado que los problemas de plagas se situaron en la zona de salida del análisis estructural (Barrera *et al.*, 2013), lo que reafirma la opinión de Barrera (2020) en el sentido que una estrategia de manejo de plagas que ignora o da poca importancia a otros elementos del sistema socioambiental, no solo tendrá pobres resultados en su manejo, también su contribución a resolver otros problemas será muy limitada. En la misma situación que los problemas de plagas, según el análisis estructural (Figura 1), se encontraron la calidad del café y la infraestructura de secado y almacenamiento del café.

Por otro lado, y como era de esperarse, la pronunciada variabilidad climática se ubicó en la zona de autonomía o de problemas autónomos del análisis estructural (Figura 1), es decir, en la zona de aquellos problemas que, por su baja dependencia y motricidad con respecto a los otros problemas del sistema socioambiental, su solución es percibida como muy difícil o imposible por el común de las personas. Esta percepción por parte de los productores de café de Mesoamérica de “nada se puede hacer” para evitar el impacto de los eventos extremos del clima (sequías, lluvias torrenciales) y de los desastres que conllevan se ha documentado en la literatura (Eakin *et al.*, 2014).

Riesgo hacia la roya

De acuerdo con el HRT (Figura 2), la mayoría ($n = 31$, 72.1 %) de los 43 productores evaluados se ubicó en la zona de riesgo bajo ante la amenaza que representa la roya

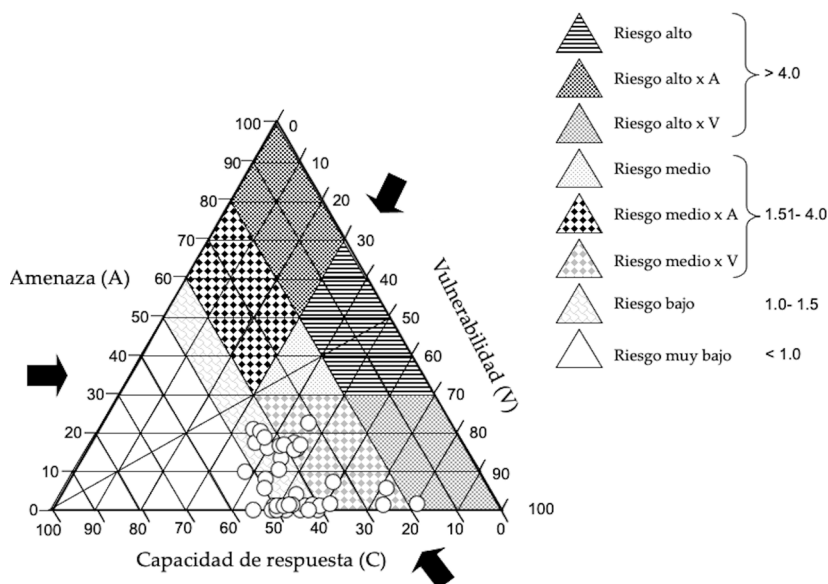


Figura 2. Triángulo holístico de riesgo para los componentes del HRI ante la roya (*Hemileia vastatrix*) de 43 productores de café de Honduras (2016-2017).

del café; el resto de los productores ($n = 12$), se ubicó en las zonas de riesgo muy bajo ($n = 2$, 4.7 %), medio ($n = 9$, 20.9 %) y alto ($n = 1$, 2.3 %).

En todos los casos, el riesgo tuvo mayor influencia del componente vulnerabilidad ($V > 34.3$ %) que del componente amenaza ($A < 22.4$ %). Por su parte, la capacidad de respuesta varió de $C = 18.0$ % para el caso del productor ubicado en el riesgo más alto ($HRI = 4.6$) hasta $C = 52.2$ % en el caso del productor con el riesgo más bajo ($HRI = 0.8$) (Figura 2, Cuadro 3).

Los promedios y las medidas de dispersión (error estándar y amplitud del intervalo) de los valores del HRI y sus componentes indicaron alta variabilidad al interior de cada zona cafetalera, lo cual pudo explicar que el ANOVA no mostrara diferencias en cuanto al HRI al comparar las zonas cafetaleras ($F = 1.765$, $gl = 2$, $p = 0.184$) (Cuadro 3). Al desglosar los componentes del riesgo en sus variables (Figura 3) se observó que la roya representó amenaza mayor (variable “infestación”) para los productores de El Paraíso (65.8 %) que para los de Olancho (33.6 %) o el Lago de Yojoa (24.5 %). Esto podría explicarse en parte porque los cafetales de los productores de El Paraíso tendieron a ubicarse en altitudes más vulnerables a esta enfermedad.

Aunque la roya fue menos importante para los productores ubicados en el Lago de Yojoa, y los valores de las variables de la vulnerabilidad fueron parecidos a los de las otras zonas cafetaleras, los valores de las variables de la capacidad de respuesta de estos productores tendieron a ser menores, en particular respecto a la variable de cafetos productivos (Figura 3).

Cuadro 3. Índice Holístico de Riesgo (HRI) ante la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) y sus componentes de 43 productores de café en tres zonas cafetaleras de Honduras (2016-2017).

Promedio y medidas de dispersión [†]	HRI y sus componentes [‡]				Núm. productores en categoría de HRI [§]			
	A	V	C	HRI ^p	MB	B	M	A
Lago de Yojoa								
$\bar{x} \pm ee$ (%)	5.4 $\pm$ 1.6	53.9 $\pm$ 2.6	40.6 $\pm$ 2.2	1.7 $\pm$ 0.2a	1	14	4	1
Intervalo (%)	0-22.4	34.3-80.5	18.0-55.2	0.8-4.6				
El Paraíso								
$\bar{x} \pm ee$ (%)	11.5 $\pm$ 2.2	44.1 $\pm$ 1.6	44.3 $\pm$ 1.2	1.3 $\pm$ 0.1a	0	10	2	0
Intervalo (%)	0-20.2	36.3-52.9	37.5-50.1	1.0-1.7				
Olancho								
$\bar{x} \pm ee$ (%)	5.8 $\pm$ 2.2	49.5 $\pm$ 1.9	44.7 $\pm$ 1.8	1.3 $\pm$ 0.1a	1	7	3	0
Intervalo (%)	0-16.8	38.2-61.2	36.2-52.1	0.9-1.8				
Todas las zonas de estudio								
$\bar{x} \pm ee$ (%)	7.2 $\pm$ 1.2	50.1 $\pm$ 1.5	42.7 $\pm$ 1.2	1.5 $\pm$ 0.1	2	31	9	1
Intervalo (%)	0-22.4	34.3-61.2	18.0-55.2	0.8-4.6				

[†] $\bar{x}$: promedio, ee: error estándar; [‡]A: amenaza (roya), V: vulnerabilidad, C: capacidad de respuesta; [§]MB: muy bajo, B: bajo, M: medio, A: alto; ^pletras iguales entre zonas de la columna del HRI indican diferencias no significativas (ANOVA, $p > 0.05$).

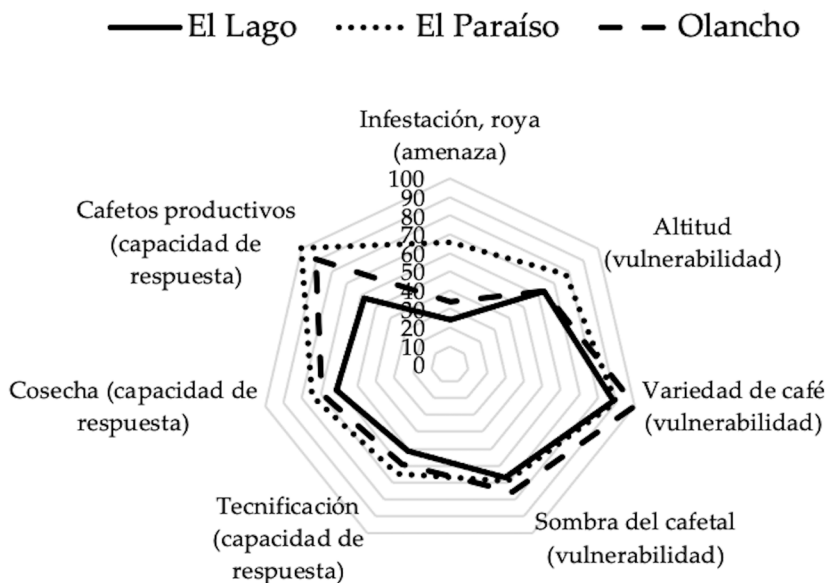


Figura 3. Comparación de las variables que integran los componentes del HRI ante la roya (*Hemileia vastatrix*) de 43 productores de café en tres zonas cafetaleras de Honduras. 2016-2017.

Por otro lado, el MANOVA aplicado a los tres componentes del HRI confirmó diferencias significativas ($p < 0.003$) entre las zonas cafetaleras bajo estudio. De acuerdo con los círculos de confianza (95 %) del análisis discriminante canónico, la zona cafetalera de Olancho fue estadísticamente igual a las zonas de El Paraíso y el Lago de Yojoa, pero estas dos últimas fueron estadísticamente diferentes entre sí (Figura 4A).

El CDA también indicó que la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta estuvieron más correlacionadas entre sí que cualquiera de éstas con la amenaza. Tomando en cuenta la longitud y la orientación de las flechas del CDA, se observa que la amenaza y la capacidad de respuesta fueron más importantes que la vulnerabilidad; en el caso de los productores de El Paraíso, la amenaza y la capacidad de respuesta fueron los constructos más importantes, mientras que la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta lo fueron para los productores de Olancho (Figura 4A). En este análisis, la primera función canónica (Can1) explicó el 91.9 % de la variabilidad de la interacción.

Por otra parte, el MANOVA aplicado por separado a los datos de vulnerabilidad reveló que no hubo diferencia significativa entre las zonas cafetaleras ($p = 0.109$). Sin embargo, este análisis aplicado a la capacidad de respuesta sí detectó diferencias significativas entre las zonas ($p \leq 0.015$). En este caso, los círculos de confianza (95 %) del CDA confirmaron que la zona cafetalera de Olancho fue igual a las zonas de El Paraíso y el Lago de Yojoa; tampoco existió diferencia significativa entre estas dos últimas (Figura 4b).

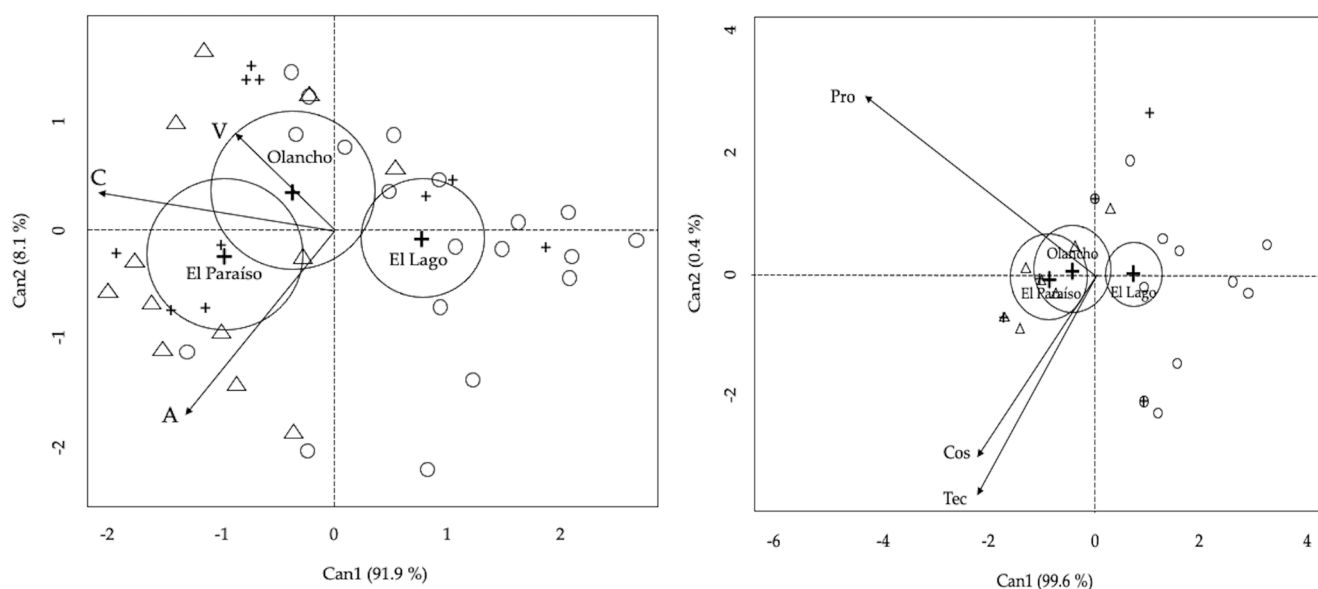


Figura 4. Comparación de la estructura discriminante canónica de los componentes del HRI (A) y las variables de la capacidad de respuesta (B) de las zonas cafetaleras del Lago de Yojoa (círculo), El Paraíso (triángulo) y Olancho (cruz), Honduras. A: amenaza (rojo), V: vulnerabilidad, C: capacidad de respuesta, Pro: categorías productivas de cafetos (% I y II), Cos: diferencia entre la cosecha obtenida y la esperada, Tec: tecnificación.

También se pudo observar que las variables “cosecha” (Cos) y “tecnificación” (Tec) estuvieron correlacionadas, mientras que el efecto de éstas fue menos importante que el efecto de la variable “categorías productivas de cafetos” (Pro). Además, fue observado que las variables Cos y Tec tuvieron mayor influencia en El Paraíso y la variable Pro fue más importante para Olancho (Figura 4B). La primera función canónica (Can1) de este análisis explicó el 99.6 % de la variabilidad de la interacción.

Resiliencia hacia la roya

La relación del HRI con la capacidad de respuesta (C), considerada una aproximación a la resiliencia (E), se ajustó a una ecuación de potencia con el coeficiente b de valor negativo, es decir, que la resiliencia disminuyó de manera potencial conforme el valor del riesgo se incrementó. Para el conjunto de los datos correspondientes a los 43 productores bajo estudio, la ecuación de potencia fue $E \approx C = 50.852 * HRI^{-0.637}$ ($R^2 = 0.99$). Con esta ecuación se obtuvieron los valores de E para HRI = 1.0, 1.5 y 4.0, valores del riesgo que corresponden a los límites de las zonas del HRT (Figura 2), y con ellos se generaron criterios prácticos para determinar las categorías de E (Cuadro 4). Según estos criterios, los productores del Lago de Yojoa fueron menos resilientes pues con HRI = 1.7 (Cuadro 3) se ubicaron en la categoría de resiliencia media ($E = 36.27$ para HRI = 1.7), mientras que los productores El Paraíso y Olancho con HRI = 1.3 (Cuadro 3) se ubicaron en la categoría de resiliencia alta ($E = 43.01$ para HRI = 1.3).

En un estudio realizado con productores de café de Chiapas, México, para estimar el riesgo ante la roya con variables diferentes a las utilizadas en esta investigación, se encontró que la ecuación que describió la relación HRI con E fue $E \approx C = 54.325 * HRI^{-0.817}$ ($R^2 = 0.98$) (Barrera, 2020). Por lo tanto, se confirma que entre el HRI y la E se establece una relación no lineal del tipo de potencia. Por otro lado, se observó que, si bien hay diferencias en la estimación de E entre la ecuación de México y la generada con productores hondureños, las diferencias fueron pequeñas. En particular, se observó que ambas ecuaciones estimaron prácticamente igual los valores de E a partir de HRI = 1.3. Queda por comprobar si a partir de conocer el riesgo, estas ecuaciones sirven de referencia para estimar la resiliencia ante la roya de productores de otras latitudes.

Cuadro 4. Criterios para definir las categorías de (E) una aproximación a la resiliencia, con base en el índice holístico de riesgo (HRI) en cafetales amenazados por la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en Honduras.

Riesgo (IHR)		Resiliencia (E)	
Categorías	Valores [†]	Valores	Categorías [‡]
Muy bajo	< 1.0	> 50.85	Muy alta
Bajo	1.0 - 1.5	39.28 - 50.85	Alta
Medio	> 1.5 - 4.0	21.03 - 39.27	Media
Alto	> 4.0	< 21.03	Baja

[†]Valores que corresponden a los límites de las zonas de la Figura 2; [‡]Valores calculados con la ecuación $E \approx C = 50.852 * HRI^{-0.637}$

Plan de trabajo con toma de decisiones basadas en gestión del riesgo

A partir del conocimiento de los principales elementos (problemas) y funcionamiento del sistema socioambiental de café de los productores participantes en este estudio (Figura 1), y la definición de los criterios para gestionar el riesgo que representó la amenaza de la roya para este sistema (Cuadro 4), con base en Barrera (2020) se propuso un plan de trabajo para reducir el riesgo e incrementar la resiliencia del sistema ante la roya del café. El plan estableció como objetivo general la mejora de la economía de los productores, pues sin recursos económicos ellos no dispondrían de medios para ejecutarlo. Para lograr el plan, el objetivo general fue desglosado en objetivos específicos y estrategias tomando los resultados del análisis estructural (Figura 1). Se propusieron cinco objetivos específicos (variables de las zonas de salida y autónoma del análisis estructural) y cuatro estrategias (variables de las zonas de poder y de conflicto). Con la finalidad de revisar el cumplimiento de metas (reducción del riesgo e incremento de la resiliencia), el estado del sistema se debe valorar al inicio de cada ciclo cafetalero. El análisis del riesgo sugiere empezar la ejecución del plan con los productores del Lago de Yojoa. En particular, se deberá trabajar para reducir la vulnerabilidad que proviene de las características de las variedades de café y la sombra, e incrementar la proporción de cafetos productivos (categorías I y II) a través de renovación de cafetales para mejorar el rendimiento. En segundo lugar, los resultados del riesgo y la resiliencia indican atender a los productores de la zona cafetalera de Olancho, cuyas plantaciones son cultivadas solo con variedades de café susceptibles a la roya. En cuanto a los productores de la zona cafetalera de El Paraíso, no obstante que los niveles de infestación de la roya fueron mayores, su capacidad de respuesta fue la mejor. En general, los resultados mostraron que los 43 productores que participaron en el estudio requieren reducir vulnerabilidad (variedades de café y sombra) e incrementar capacidad de respuesta (tecnificación para mejorar el rendimiento y calidad de la cosecha).

CONCLUSIONES

Los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema socioambiental de producción de café en agroecosistemas en Honduras se identificaron. También se definieron los criterios para gestión del riesgo que representa la roya del café causada por el hongo *Hemileia vastatrix* para estos agroecosistemas.

Con la información obtenida se diseñó un plan de trabajo como propuesta para reducir el riesgo e incrementar la resiliencia del sistema ante la roya del café, a fin de mejorar la economía de los productores.

Por último, se identificaron las zonas cafetaleras más vulnerables y con menor capacidad de respuesta ante la amenaza de la roya; y a partir de ello se puede orientar la toma de decisiones en el manejo de esta enfermedad.

AGRADECIMIENTOS

En especial a los 43 productores de café del Lago de Yojoa, El Paraíso y Olancho, Honduras, que participaron en esta investigación. Al equipo técnico del Instituto Hondureño del Café (IHCA-

FÉ) y de los estudiantes de práctica profesional del Centro Regional Universitario del Litoral Atlántico (CURLA), asignados al IHCAFE en 2016-2017, por su apoyo en campo. Al equipo técnico de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) Unidad Tapachula por su apoyo en la capacitación sobre el Muestreo Agroecológico Rápido. Al M.E. Javier Valle (ECOSUR) por su asesoría en el análisis de datos. Al Programa de Posgrado de Ciencias en Producción Agropecuaria de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) Unidad Laguna por el financiamiento de los viajes y materiales de campo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por la beca para estudios doctorales otorgada a Carolina Reyes-Robles.

REFERENCIAS

- Altieri MA, Nicholls CI. 2013. Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología* 8 (1): 7–20.
- Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, Morales C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security* 7: 303–321. <http://dx.doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- Barrera JF. 2020. Beyond IPM: Introduction to the theory of Holistic Pest Management. Springer Nature: Switzerland. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-43370-3>
- Barrera JF, Gómez-Ruiz J, Parra-Vázquez MR, Mercado-Vidal G, Williams T. 2013. Análisis de problemas ocasionados por plagas del café bajo un enfoque holístico. *Entomología Mexicana* 12: 1128–1133.
- Barrera JF, Parra-V M, Herrera-H OB, Jarquín-G R, Pohlan J. 2004. Plan Estatal de Manejo Agroecológico del Café en Chiapas: Una Guía para una Cafeticultura Sustentable. Comisión para el Desarrollo y Fomento del Café de Chiapas y El Colegio de la Frontera Sur. Tapachula, Chiapas, México. <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000041940> (Recuperado: noviembre 2021).
- Deguine JP, Aubertot JN, Flor RJ, Lescourret F, Wyckhuys KAG, Ratnadass A. 2021. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 41: 38. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w>
- Eakin H, Tucker C, Castellanos E, Díaz R, Barrera JF, Morales H. 2014. Adaptation in a multi-stressor environment: Perceptions and responses to climatic and economic risks by coffee growers in Mesoamerica. *Environment, Development and Sustainability* 16: 123–139. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-013-9466-9>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2019. Glosario de Términos Fitosanitarios. Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias No. 5. Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/mc891s/mc891s.pdf> (Recuperado: febrero 2022).
- Friendly M Fox J. 2021. Candisc: Visualizing generalized canonical discriminant and canonical correlation analysis. R package version 0.8-6. <https://CRAN.R-project.org/package=candisc> (Recuperado: noviembre 2021).
- Gazzano I, Altieri MA, Achkar M, Burgueño J. 2015. Holistic Risk Index: A case study of cattle producers in the protected area of Farrapos Estuaries-Uruguay. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 39: 209–223. <http://dx.doi.org/10.1080/21683565.2014.967439>
- ICO (International Coffee Organization). 2015. Annual Review 2013-2014. Strengthening the global coffee sector HRTough international cooperation. <http://www.ico.org/documents/cy2014-15/annual-review-2013-14-electronic-e.pdf> (Recuperado: junio 2021).
- ICO (International Coffee Organization). 2020. The value of coffee. Sustainability, inclusiveness, and resilience of the coffee global value chain. Development report. ICO FR/01/19E. <https://www.internationalcoffeecouncil.com/cdr2020?lang=es> (Recuperado: julio 2021).
- Krishnan S, Matsumoto T, Nagai C, Falconer J, Shriner S, Long J, Medrano JF, Vega FE. 2021. Vulnerability of coffee (*Coffea* spp.) genetic resources. *Genetic Resources and Crop Evolution* 68: 2691–2710. <http://dx.doi.org/10.1007/s10722-021-01217-1>
- Montalba R, García M, Altieri M, Fonseca F, Vieli L. 2013. Utilización del Índice Holístico de Riesgo (HRI) como medida de resiliencia socioecológica a condiciones de escasez de recursos hídricos. Aplicación en comunidades campesinas e indígenas de la Araucanía, Chile. *Agroecología* 8 (1): 63–70.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (Recuperado: noviembre 2021).



In vitro MOLECULAR IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF *Pleurotus* spp. STRAINS IN GUANAJUATO, MEXICO

Socorro Morales-Flores¹, Jonathan Cepeda-Negrete¹, Gerardo Mata-Montes de Oca²,
Arturo Ángel-Hernández¹, Jesús Hernández-Ruiz¹, Jorge Eric Ruiz-Nieto^{1*}

¹ Universidad de Guanajuato. División de Ciencias de la Vida. Posgrado en Biociencias. Carretera Irapuato-Silao km 9, Col. Centro, Irapuato, Guanajuato, Mexico. C. P. 36500.

² Instituto de Ecología A. C. Carretera Antigua a Coatepec No. 351, Col. El Haya, Xalapa, Veracruz. C. P. 91073.

* Corresponding author: jorge.ruiz@ugto.mx

ABSTRACT

The consumption of edible fungi has increased worldwide due to its nutritional and functional properties. In the state of Guanajuato, Mexico, the production of these fungi depends on the import of strains from different species. This is due to a lack of isolation and characterization of regional mycogenetic resources such as in the case of the “Maguey mushroom”. The aim of this study was to carry out the *in vitro* molecular identification, morphological characterization, and antioxidant biochemistry of a strain of *Pleurotus* sp. in Guanajuato, Mexico, and to compare it to commercial strains. The hypothesis proposed is based on the possibility of isolating a regional strain with adequate mycelial characteristics for its *in vitro* cultivation. A wild strain called UG-01 was collected and isolated from an *Agave mapisaga* plant and its identity was determined by sequencing the region ITS1-5.8S-ITS2. The strain was cultivated *in vitro*, and the mycelium was characterized; an experimental strain and four commercial ones were included as a control. The results were analysed in a totally randomized design. The “Maguey mushroom” strain was identified as *Pleurotus djamor*. Based on the CIE L*a*b system, the coordinates 86.2, -5.6 and -4.1 were obtained, along with 33.1 and 21.7 for Hue and Chroma. The UG-01 strain displayed the highest growth rate with a cottonlike structure and without exudates. In addition, it presented the highest concentration of proline, phenolic compounds, and flavonoids, as well as the lowest remains of 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH). In conclusion, it was possible to cultivate the mycelium of the “Maguey mushroom” *in vitro*, which displayed better morphological and antioxidant biochemistry in comparison with the imported commercial strains.

Keywords: Edible fungi, analysis of images, mycelial growth, antioxidants.

INTRODUCTION

The genus *Pleurotus* represents one of the most important groups of cultivated edible fungi worldwide, since it is second place in terms of production and makes up 19 % of the world production, with 6.46 x 10⁶ Mg annually. It is known for being efficient in degrading lignocellulosic waste and for producing edible basidia with highly nutraceutical and organoleptic qualities, as well as vitamins, minerals, and some essential amino acids (Musieba *et al.*, 2013).

Citation: Morales-Flores S, Cepeda-Negrete J, Mata-Montes de Oca G, Ángel-Hernández A, Hernández-Ruiz J, Ruiz-Nieto JE. 2022. *In vitro* molecular identification and characterization of *Pleurotus* spp. strains in Guanajuato, Mexico. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2780>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 29, 2021.
Approved: March 07, 2022.
Estimated publication date:
April 26, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 294-315.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



Basidia of this genus are considered a functional food. They also have antioxidant (Huaping *et al.*, 2019), antibiotic, antitumoral (Al-Saffar *et al.*, 2020), anti-inflammatory and antimicrobial properties (Bains *et al.*, 2020). Active compounds have been isolated from the extracts of this fungus, which are used to treat several chronic degenerative diseases. The species of *Pleurotus* are used in the areas of pharmacology, the food industry, environmental science, and nutrition (Chaurasia *et al.*, 2020).

In Mexico, the production of *Pleurotus* at an industrial scale is carried out with foreign strains (León-Avendaño *et al.*, 2013). However, there are native genetic resources that make up a broad genetic base with the potential to produce and obtain biologically active secondary metabolites, which can adapt to the environmental conditions of arid regions, such as the species known as the "Maguey mushroom" (*Pleurotus* sp.), which grows in the wild on the necro mass of "agave pulquero" plants.

This type of fungus is appreciated and sold in the central area of the country due to its pleasant taste (Barrales and Mata, 2016). The presence of this fungus has been found in the semi-arid areas of central Mexico, though its distribution may be wider, since the *Agave* genus is typical of the Mexican arid and semi-arid ecosystems, which cover approximately 60 % of Mexico's territory (Montaño *et al.*, 2016).

The genus *Pleurotus* represents a wide genetic variability, and therefore the morphological characteristics at *in vitro* cultivation may contribute to a more complete characterization of the organisms. These characteristics can also be used as a parameter of selection to obtain more productive strains (Cardoso *et al.*, 2017). The vast majority of studies on the properties of fungi use the fruit-bearing bodies. However, secondary metabolite compounds are also found in the mycelium. The hypothesis presented is based on the possibility of the isolation of a regional strain with adequate mycelial characteristics for its *in vitro* cultivation. The aim of the present study was to perform an *in vitro* molecular identification, morphological characterization, and antioxidant biochemistry of a strain of *Pleurotus* sp. in Guanajuato, Mexico.

MATERIALS AND METHODS

Collection and isolation

A strain of *Pleurotus* sp. was isolated from an adult plant of *Agave mapisaga* species in the Centro Nacional de Agaves (National Agave Center) of the University of Guanajuato in Mexico. The fungus collected was found in the wild in Copal, Irapuato, Guanajuato; located in the coordinates 20° 40' 22" N, 101° 20' 53" W, at an altitude of 1715 m. The climate is semi-warm and sub-humid, with rains in the summer Acw, and temperatures ranging from 12 to 26 °C, an average annual rainfall of 716 mm and the predominant vegetation is xeric shrubland. A specimen was collected and placed in a previously disinfected container. The carpophore was disinfected with 2 % NaClO for 1 min and was later rinsed using sterile distilled water. The mycelium was isolated vegetatively, cutting 1 cm² pieces from the middle of the fruit-bearing body.

For cultivation *in vitro*, a potato-dextrose-agar medium (PDA) was used in Petri dishes with a volume of 95.4 cm³. The inoculated dishes were incubated at 25 °C in

complete darkness. Several sub-cultivations were performed until pure cultivations were obtained. As a control, the strain IE-837 was included, which had been donated by the Mexican Institute of Ecology (Instituto de Ecología A. C.) (Barrales and Mata, 2016) and four introduced strains which are produced and sold in the area, and which were labelled GR-1, BR-1, BL-1, and BL-2.

Mycelial characterization

From the cultivations *in vitro*, the mycelial growth (MG; cm d⁻¹) was determined by transferring mycelium fragments, 1 cm in diameter, to Petri dishes with freshly prepared PDA medium and incubating at 25 °C. The growth was recorded after 6 d, based on the measurements of two-dimensional distances on the axes (*x*, *y*) previously traced from the centre of each dish. The Growth Rate (GR; cm d⁻¹) was determined using the formula by Benítez *et al.* (2007). When the mycelium covered the medium in its entirety, digital images were taken under controlled and homogenous conditions, using a box with a white interior and a constant white LED light.

The images were taken using a 13 mega pixel Nikon W150 digital camera, with an HD resolution of 1400 x 720 pixels. The images were taken at a distance of 9.5 cm between the lens and the culture and analysed with a recognition algorithm specifically designed for this study using the software MATLAB R2019a, manufactured by MathWorks®. The color of the samples was determined using the system CIE L*a*b, to then calculate the Hue angle and the Chroma index. Based on the saturation of pixels, the density of the mycelium was established (DEN; g cm⁻³).

The texture (TEX) was analysed using the visual keys described by Carreño-Ruiz *et al.*, (2013), as well as the presence and/or absence of exudates (EXU). Regarding the biochemical characterization of the mycelium, the concentration of proline (PRO; µg mL⁻¹) was established with the reaction of this amino acid with 2,2-DihydroxyIndeno-1,3-dione, and the spectrophotometric measurement was performed at 517 nm. The concentration of phenolic compounds (PC; µg mL⁻¹ of gallic acid) was carried out by spectrophotometry at 750 nm based on the formation of the phosphotungstic-phosphomolybdenum complex. For both PRO and PC, the quantification was carried out with calibration curves ($r^2 > 0.99$).

Antioxidant activity was analysed with 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS). Absorbances were determined by their spectrophotometric measurements at 515 and 754 nm, respectively. For both determinations, the results were reported as the percentage of remaining radical.

Molecular identification

Mycelium samples of each strain were planted in a PDA medium. From the recovered mycelium, the genomic DNA was extracted, following the methodology described by Gómez-Luna *et al.* (2012). The integrity of the samples was evaluated by electrophoresis in 1 % agarose gel with a TBE 1X solution, which was stained

with GelRed® (Biotium). The purity as determined by spectrophotometry and the concentrations were normalized at 200 ng μL^{-1} . The region ITS1-5.8S-ITS2 was then amplified by PCR using the primers ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') and ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') (White *et al.*, 1990).

Amplifications were performed using the kit MyTaq™ Mix (Bioline), using 50 μL reactions containing 200 ng of DNA, 20 μM of each primer and 50 μL of the Mix 2x. The conditions of the reaction consisted of 30 denaturalization cycles at 95 °C for 5 min, alignment at 51 °C for 30 s and synthesis at 72 °C for 1 min, followed by a final extension at 72 °C for 10 min. The PCR products were sequenced by capillary technology using the method by Sanger *et al.* (1977). The BigDye® Terminator v. 3.1 kit (Applied Biosystems) and the platform ABI 3730xl (Applied Biosystems) were used. The identities of the sequences were determined by comparison in the GenBank data base, with the option BLAST 1.17. Alignments were carried out between the sequences obtained using the software Clustal W 2.1, the phylogenetic tree was created using the software FastTree 2.1.8 and the neighbour-joining method (Saitou and Nei, 1987).

Statistical analysis

Quantitative data (MG, GR, and DEN) were analysed in a totally randomized design with five repetitions performing Tukey mean separation tests ($p \leq 0.05$). For the qualitative variables TEX and EXU, results were analysed in a totally randomized design with 10 repetitions using the Kruskal-Wallis test. All statistical analyses were carried out using the Minitab® 16.2.3 (Minitab, 2010).

RESULTS AND DISCUSSION

Description of the environment

The “Maguey mushroom” was found on the necro mass of *Agave mapisaga* plants from September to December. Barrales and Mata (2016) found *Pleurotus opuntiae* growing on *Agave salmiana* Otto plants in a temperate semi-dry BS1k climate at 2340 m and a temperature of 12-14 °C.

In situ morphological characterization

The specimen collected presented the following morphological characteristics: smooth pileum between 80 and 125 mm, hymenium with creases, insertion of decurrent sheet, wavy margin, eccentric stipe or no stipe, white spores, no volva, or ring. Phylogenetic studies report that *P. agaves*, *P. opuntiae* and *P. djamor* grow in Mexico (Zervakis *et al.*, 2019). The fungus found in maguey plants has been morphologically classified by some authors as *Pleurotus opuntiae* (Durieu et Lév.) (Camacho *et al.*, 2012).

Molecular identification

PCR products were obtained between 600 and 650 base pairs (bp) with oligonucleotides ITS1-ITS4. The UG-01 strain collected was identified as *Pleurotus djamor* with a maximum identity of 99.3 % ($E < 0.0$) with the accession number KX573927. The strain

IE-837 (Barrales and Mata, 2016) was identified as *Pleurotus flabellatus*, with a maximum identity of 99.8 % ($E < 0.0$) with accession number MF459667.1. The commercial strain BL-1 corresponded by 98.7 % ($E < 0.0$) to *Pleurotus ferulaginis* with accession number MF076894.1, whereas strains BL-2 (99.8 %, $E < 0.0$, LT627806.1), BR-1 (98.6 %, $E < 0.0$, KY686275.1) and GR-1 (99.2 %, $E < 0.0$, LC602510.1) were identified as *Pleurotus ostreatus*. This is one of the most economically important species in the country; it is imported from Europe (Zervakis *et al.*, 2019), Asia and North America.

The species *Pleurotus djamor* presents a pantropical distribution (Salmones, 2017). In Mexico, it has been gathered in tropical and subtropical areas of the south (Chiapas, Tabasco, and Yucatán), centre (Puebla and Morelos), west (Jalisco and Michoacán) and east (Veracruz). It grows on dead trunks and branches of diverse tree and bush species.

The phylogenetic tree shows that the strain UG-01 is found in an independent group, indicating that it is further related to the other strains. It also indicates that commercial strains BL-2 and BL-1 share a common recent ancestor, along with strains BR-1 and GR-1 (Figure 1), and the commercial strains are equally related to the wild strain IE-837.

In vitro morphological characterization

Significant differences were found ($p \leq 0.05$) in luminosity (L), with values ranging from 86.2 to 87.6, with the highest value in strain IE-837. Regarding coordinate a*,

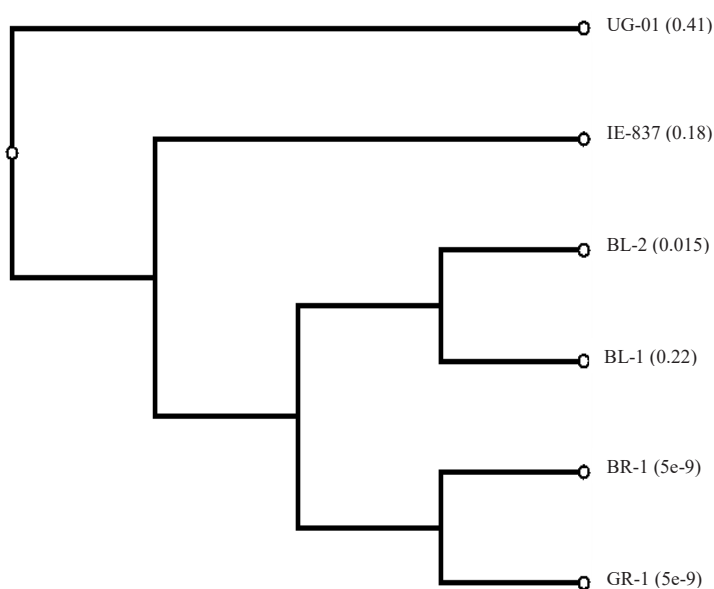


Figure 1. Phylogenetic tree of *Pleurotus* spp. strains. IE-837: donated strain, *Pleurotus flabellatus*, UG-01: gathered strain, *Pleurotus djamor*, BL-2: commercial strain, *Pleurotus ostreatus*, BL-1: commercial strain, *Pleurotus ferulaginis*, BR-1: commercial strain, *Pleurotus ostreatus*, GR-1: commercial strain *Pleurotus ostreatus*.

significant differences were found ($p \leq 0.01$). Negative values indicate green tones, with strains BL-1 and BR-1 being those that were located in this space (Table 1).

In coordinate b^* , significant differences were identified ($p \leq 0.05$); the negative values for b^* were coloured blue, and the strain that presented pigments of this colour was GR-1, with a value of -4.6. In the case of the Hue index, significant differences were identified ($p \leq 0.01$) with values between 33.1 and 38.5. In the case of the Hue index, values from 0 to 90 indicate a tendency that gradually goes from red to a combination with yellow until the latter is fully defined. Colour is related to the presence of some secondary metabolites; phenolic compounds display colours such as red, pink, blue or purple, whereas some flavonoids display colours in the yellowish-white tones (Gülçin, 2012).

So far, most studies have used visual keys or references to determine the colour by comparison. According to this method, the species *Pleurotus djamor* presents a white or yellowish mycelium (León-Avendaño *et al.*, 2013).

The analysis of images of mycelia helped differentiate variations in the colour that would correspond to an equally different biochemical composition (Figure 2).

Regarding MG, significant differences were found between treatments ($p \leq 0.01$). Strain UG-01 covered 100 % of the area of the Petri dish after 6 d. In general terms, the commercial strains had a similar growth, whereas IE-837 covered 55 % in the same period, displaying slower growth. This difference may be due to this strain coming from an area 2345 m, in which the average temperature is 12-14 °C. Ahmad *et al.* (2015) reported that *Pleurotus djamor* grew in 5.25 d. The difference in mycelial growth relates to the type of enzymes present in each species and their ability to make use of energy sources.

Table 1. Morphological characteristics evaluated in the mycelia of the *Pleurotus* spp. strains.

Variables	UG-01	IE-837	BL-1	BL-2	BR-1	GR-1
<i>Quantitative</i>						
L	86.2 b	87.6 a	86.9 ab	87.0 ab	87.2 ab	86.8 ab
a	-5.6 bc	-5.0 ab	-5.7 c	-5.2 a	-5.7 c	-5.4 abc
b	-4.1 ab	-4.1 ab	-3.9 a	-4.2 ab	-4.5 ab	-4.6 b
Chroma	21.7 a	22.3 a	23.9 a	20.3 a	21.2 a	22.4 a
Hue	33.1 b	37.5 ab	36.5 ab	36.8 ab	34.0 ab	38.5 a
CM	4.0 a	2.2 d	3.8 ab	3.3 c	3.9 ab	3.7 b
TC	0.9 d	0.3 a	0.7 c	0.4 b	0.6 c	0.6 c
DEN	0.988 ab	0.986 ab	0.985 b	0.989 ab	0.989 ab	0.990 a
<i>Qualitative</i>						
TEX	Cottonlike	Cottonlike	Zoned	Zoned	Zoned	Zoned
EXU	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent

Variables: L: Luminosity, a: red-green coordinates, b: yellow-blue coordinates, Chroma: saturation, Hue: tone, MG: mycelial growth (cm d^{-1}), DEN: density (g cm^{-3}), GR: growth rate (cm d^{-1}), TEX: texture, EXU: exudates. Means with different letters in each row indicate significant differences among evaluated mycelia (Tukey; $p \leq 0.05$).

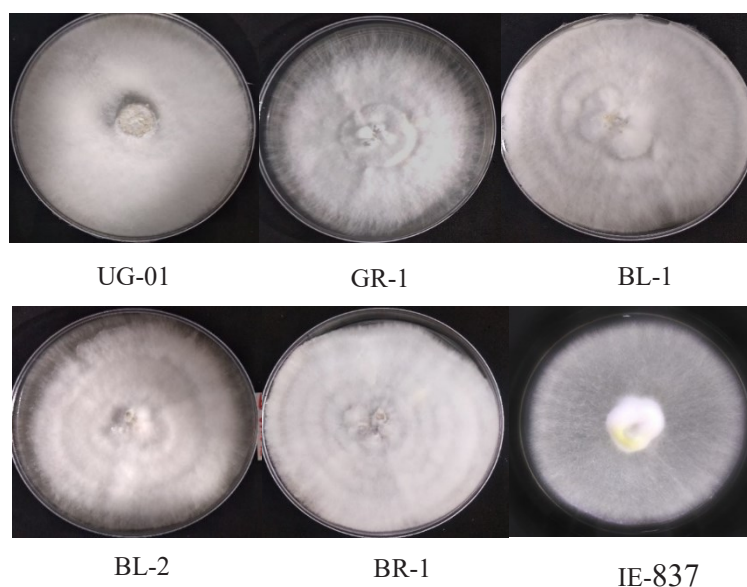


Figure 2. Colour of the different strains of the genus *Pleurotus* determined by an image analysis system with the coordinates L^*a^*b and the index C and Hue, isolated and stored in a PDA culture.

Significant difference ($p \leq 0.01$) was found in the GR, with a daily growth interval of 0.3 to 0.9 cm d⁻¹. Strain UG-01 surpassed the growth of commercial strains (GR-1, BR-1, BL-1, BL-2); the lowest GR was displayed by IE-837 (0.3) (Table 1). Aguilar-Pumahuillca *et al.* (2019) reported a growth rate over 1.09 – 1.14 cm d⁻¹ for *P. djamor* in a PDA culture.

It is important to consider that a faster mycelial growth in the culture medium favours the reduction of cultivation cycles in the production process and the reduction in the capture of contaminants. The strain gathered has the potential to be cultivated *in vitro*, since it responds positively to temperature, making this a very important factor. The cultivation of *Pleurotus* in the state of Guanajuato has had limited development since imported commercial strains are used, which grow and bear fruit at temperate temperatures..

The evaluated strains presented significant differences ($p \leq 0.01$) in DEN, with strain GR-1 presenting the highest density, with a value of 0.989 g cm⁻³. Strain UG-01 presented a regular density with the presence of a creeping, scarce and homogeneously distributed mycelium. Under favourable conditions, fungi increase the branching of their hyphae and therefore the amount of biomass, increasing the efficiency of the supply of nutrients by increasing their surface area. High densities are distinguished by the presence of an aerial, abundant and homogeneously distributed mycelium.

León-Avendaño *et al.* (2013) report that *Pleurotus djamor* strains present a high density, which coincides with the results of this study. Regarding TEXm statistical differences

($p \leq 0.01$) were identified. The commercial strains GR-1, BL-1, BR-1, and BL-2 developed a zoned texture, which may be a chemotrophic response induced by the gradient of nutrients in the medium and the incubation temperature. Meanwhile, wild strains IE-837 and UG-01 presented a cottonlike texture. In turn, Acosta-Urdapilleta *et al.* (2016) mentioned that the *Pleurotus* spp. strains may present a cottonlike, velvety or woolly texture. Regarding the presence of exudates (EXU), no significant differences were found ($p > 0.05$).

The species *Pleurotus djamor* and *Pleurotus albidus* present light brown or amber-coloured exudates in a PDA medium, which is related to the secondary metabolism and the synthesis of diverse chemical compounds as a natural survival response (Carreño *et al.*, 2013).

Regarding the biochemical characterization of the mycelium, significant differences were identified between strains ($p \leq 0.01$). Strain UG-01 displayed the highest levels of proline ($57 \mu\text{g mL}^{-1}$), since it may have developed adaptations that help it survive in minimal water conditions and continue the biological cycle. Water limitations are typical of the state of Guanajuato, where the strain UG-01 was isolated. The accumulation of proline acts as an osmotic agent to protect the mycelium from drying. Differences in PC were also significant among strains ($p \leq 0.01$). Strain UG-01 displayed the highest value ($362.0 \mu\text{g mL}^{-1}$ of gallic acid). Strains BL-2, GR-1, and BR-1, identified as *P. ostreatus*, presented statistically different values, which may be due to the different isolations of one same species being able to produce significantly different secondary metabolites, leading to the individuality of the species and that depend on their genetic characteristics.

Ferrer-Romero *et al.* (2019) reported that the *P. ostreatus* mycelium presents diversity in its phenolic compounds, which vary according to the genetic factors and the conditions of cultivation. Vamanu (2014) reported a concentration of 35.4 mg g^{-1} of gallic acid in the mycelium of *P. ostreatus*. Likewise, significant differences ($p \leq 0.01$) were found in FLA with values ranging from 30 to 69 mg mL^{-1} (Table 2). In *P. ostreatus* mycelia, total values of 28.0 (Vamanu, 2014) and 4.4 mg EQ g^{-1} (Ćilerdžić *et al.*, 2015) have been reported in an ethanolic extract. The fungi contain flavonoids such as naringenin, rutin,

Table 2. Antioxidant biochemical variables evaluated in the mycelia of *Pleurotus* spp. strains.

Variable	UG-01	IE-837	BL-1	BL-2	BR-1	GR-1
PR	57.0 a	54.0 c	56.0 b	56.0 b	56.0 b	56.0 b
CF	362.0 a	94.0 e	246.0 d	342.0 ab	327.0 bc	305.0 c
FLA	69.0 a	30.0 d	35.0 d	64.0 a	57.0 b	48.0 c
DPPH	20.8 e	78.6 a	62.4 b	23.3 e	30.4 d	43.2 c
ABTS	28.5 cd	83.7 a	48.3 b	23.3 d	26.5 d	43.8 bc

Concentration of proline (PR, $\mu\text{g mL}^{-1}$), concentration of phenolic compounds (PC, $\mu\text{g mL}^{-1}$ of gallic acid), concentration of flavonoids (FLA, mg mL^{-1}), antioxidant activity based on the remaining DPPH and ABTS (DPPH, ABRs, %). Means with different letters in each row are statistically different (Tukey; $p \leq 0.05$).

morin and resveratrol. Finally, the amount and variety of compounds also depends on the fungus species.

Significant differences ($p \leq 0.01$) were found in the antioxidant capacity using both 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazolin)-6-sulfonic acid (ABTS). Absorbances were determined as. In the former case, strains UG-01 (20.8 %) and BL-2 (23.3 %) displayed the lowest remaining radical percentages, whereas strain IE-832 presented the highest percentage (78.6 %), indicating the lowest antioxidant activity rate. Vamanu (2012) indicated that the cleansing activity of DPPH at a maximum concentration of 20 mg mL⁻¹ fluctuated between 58.8 and 89.9 % with an ethanolic extract of *Pleurotus ostreatus* mycelia. Oropeza-Guerrero *et al.* (2018) reported a mean maximum inhibiting concentration of 10.76 ± 0.27 mg mL⁻¹ in the reduction of DPPH, in the mycelium of *Pleurotus djamor* var. Roseus. Islas-Santillán *et al.* (2017) indicated a positive correlation between the concentration of polyphenols and the antioxidant activity in the genus *Ganoderma*.

Regarding ABTS, the strains that displayed the highest antioxidant activity were BL-2, BR-1 and UG-01, with values of 23.3, 26.5 and 28.5 %, respectively (Table 2). The neutralizing activity of DPPH and ABTS is linked in 62.4 % to the total content of phenolic compounds (Rivas-Mena *et al.*, 2015). Vamanu (2012) concluded that the *Pleurotus* mycelium extracts can be used as a rich source of antioxidants in pharmaceutical products. This is due to an important group of antioxidant compounds found in this fungus reacting by the transfer of hydrogen radicals and the transfer of electrons.

CONCLUSIONS

The UG-01 strain collected from the "Maguey mushroom" was identified as *Pleurotus djamor*. In the *in vitro* cultivation, this strain displayed a higher mycelial growth and antioxidant capacity than the imported strains, the mycelia of which are used in the commercial production.

REFERENCES

- Acosta-Urdapilleta ML, Téllez-Téllez M, Villegas E, Estrada A, Díaz-Godínez G. 2016. Caracterización de cinco especies de *Pleurotus* crecidas en cuatro medios de cultivo. Mexican Journal of Biotechnology 1: 1–11.
- Aguilar-Pumahuilca F, Huamán-Huamán H, Holgado-Rojas M. 2019. Caracterización de *Pleurotus* sp. aislado de la comunidad nativa de Korimani, centro poblado de Kiteni-Echarate, La Convencion, Cusco, Perú. Ecología Aplicada 18 (1): 45–50. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v18i1.1305>
- Ahmad I, Fuad I, Khan ZK. 2015. Mycelia growth of pink oyster (*Pleurotus djamour*) mushroom in different culture media and environmental factors. Agriculture and Food Sciences Research 2 (1): 6–11.
- Al-Saffar AZ, NA Hadi, HM Khalaf. 2020. Antitumor activity of β -glucan extracted from *Pleurotus eryngii*. Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology 14 (3): 2492–249.
- Bains A, Chawla P, Tripathi A, Sadh PK. 2020. A comparative study of antimicrobial and anti-inflammatory efficiency of modified solvent evaporated and vacuum oven dried bioactive components of *Pleurotus floridanus*. Journal of Food Science and Technology 58 (9): 3328–3337. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04891-8>

- Barrales M, Mata G. 2016. Selección de cepas nativas del hongo de maguey (*Pleurotus opuntiae*) y evaluación de su producción en sustratos fermentados. *Interciencia* 41 (5): 346–352.
- Benítez S, Bentley J, Bustamante P, Sánchez LC, Corrales L. 2007. Aislamiento de los microorganismos cultivables de la rizosfera de *Ornithogalum umbellatum* y evaluación del posible efecto biocontrolador en dos patógenos del suelo. *NOVA* 5 (008): 147–153. <http://dx.doi.org/10.22490/24629448.383>
- Camacho M, Guzmán G, Guzmán-Davalos L. 2012. *Pleurotus opuntiae* (Durieu et Lev.) Sacc. (Higher Basidiomycetes) and other species related to *Agave* and *Opuntia* Plants in Mexico: taxonomy, distribution, and applications. *International Journal of Medicinal Mushrooms* 14 (1): 65–78. <http://dx.doi.org/10.1615/IntJMedMushr.v14.i1.70>
- Cardoso RVC, Fernandes Â, Oliveira MBPP, Calhella RC, Barros L, Martins A, Ferreira ICFR. 2017. Development of nutraceutical formulations based on the mycelium of *Pleurotus ostreatus* and *Agaricus bisporus*. *Food Function* 8: 2155. <http://dx.doi.org/10.1039/c7fo00515f>
- Carreño-Ruiz SD, Cappello-García S, Gaitán-Hernández R, Cifuentes-Blanco J, Rosique-Gil JE. 2013. Caracterización del crecimiento micelial *in vitro* de *Pleurotus albidus* Pegler 1983 y *Pleurotus djamor* Boedijn 1959, en Tabasco, México. *Kuxulcab* 19: 37–46. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a19n37.348>
- Chaurasia PK, Shashi SL, Kumar S. 2020. Recent studies on biotechnological roles of *Pleurotus* spp. *Journal Biotechnology and Bioprocessing* 1: 3. <http://dx.doi.org/10.31579/2766-2314/018>
- Ćilerdžić J, Stajić M, Vukojević J, Milovanović I, Muzgonja N. 2015. Antioxidant and antifungal potential of *Pleurotus ostreatus* and *Agrocybe cylindracea* basidiocarps and mycelia. *Current Pharmaceutical Biotechnology* 16 (2): 179–186. <http://dx.doi.org/10.2174/1389201015666141202152023>
- Ferrer-Romero JC, Mas-Diego SM, Beltrán-Delgado Y, Morris-Quevedo HJ, Díaz-Fernández U. 2019. Estudio cinético de la producción de biomasa y compuestos fenólicos por *Pleurotus ostreatus* en fase sumergida. *Revista Cubana de Química* 31 (1): 16–30.
- Gómez-Luna BE, Vázquez-Marrufo G, Herrera-Méndez CH, Hernández Morales A, Olalde-Portugal V. 2012. Utilización de marcadores moleculares para el estudio de hongos basidiomicetes silvestres. *Ra Ximhai* 8: 131–141.
- Gülçin I. 2012. Antioxidant activity for food constituents: A review. *Archives of Toxicology*. 86: 345–391. <http://dx.doi.org/10.1007/s00204-011-0774-2>
- Huaping L, Huajie Z, Zheng G, Xinling S, Wenshuai W, Fangfang Y, Feng F, Yiwen Z, Jianjun Z, Shuliang Z, Le J. 2019. The antioxidant and anti-aging effects of acetylated mycelia polysaccharides from *Pleurotus djamor*. *Molecules* 24: 2698. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules24152698>
- Islas-Santillán MÁ, Castañeda-Ovando A, Álvarez-Delgadillo A, Valenzuela-Garza R, Romero-Bautista L, Torres-Valencia JM. 2017. Estudio preliminar de la actividad antioxidante de tres especies del género *Ganoderma* (Polyporaceae) nativas del estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Micología* 46: 37–45.
- León-Avendaño H, Martínez-García R, Caballero-Gutiérrez P, Martínez-Carrera D. 2013. Caracterización de dos cepas de *Pleurotus djamor* nativas de Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1285–1291.
- Minitab. 2010. Minitab 17 Statistical Software. Computer software. State College, PA, USA. Minitab Inc.
- Montaño NM, Ayala F, Bullock SH, Briones O, García-Oliva F, García-Sánchez E, Maya Y, Perroni Y, Siebe C., Tapia-Torres Y, Troyo E, Yépez E. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana* 34: 39–59.
- Musieba F, Okoth S, Mibey RK, Wanjiku S, Moraa K. 2013. Proximate composition, amino acids, and vitamins profile of *Pleurotus citrinopileatus* singer: an indigenous mushroom in Kenya. *American Journal of Food Technology* 8: 200–206. <http://dx.doi.org/10.3923/ajft.2013.200.206>
- Oropeza-Guerrero MP, Santos-Sánchez NF, Salas-Coronado R, Valadez-Blanco R, Hernández-Carlos B, Guadarrama-Mendoza PC. 2018. Productivity and antioxidant activity of wild, reconstituted, and hybrid strains of the pink oyster mushroom, *Pleurotus djamor* (Agaricomycetes), from Mexico. *International Journal of Medicinal Mushrooms* 20: 607–621. <http://dx.doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.2018026382>
- Rivas-Mena KE, Muñoz DL, Pino-Benítez CN, Balcázar-Morales N. 2015. Actividad antioxidante, contenido fenólico total y citotoxicidad de extractos polares obtenidos de plantas antidiabéticas colombianas. *Revista Cubana de Plantas Medicinales* 20 (3): 277–289.

- Salmones D. 2017. *Pleurotus djamor*, un hongo con potencial aplicación biotecnológica para el neotrópico. *Revista Mexicana de Micología* 46: 73–85.
- Sanger FG, Air M, Barrell BG, Brown NL, Coulson AR, Fiddes CA, Hutchison CA, Slocombe PM, Smith M. 1977. Nucleotide Sequence of Bacteriophage phiX174 DNA. *Nature* 265: 687–695.
- Saitou N, Nei M. 1987. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution* 4 (4): 406–425. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454>
- Vamanu E. 2012. *In vitro* antimicrobial and antioxidant activities of ethanolic extract of lyophilized mycelium of *Pleurotus ostreatus* PQMZ91109. *Molecules* 17 (4): 3653–3671 <http://dx.doi.org/10.3390/molecules17043653>
- Vamanu E. 2014. Antioxidant properties of mushroom mycelia obtained by batch cultivation and tocopherol content affected by extraction procedures. *Biomed Research International* 1–8. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/974804>.
- White JT, Bruns T, Lee S, Taylor J. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications* (1st. edition), Innis MA, DH Gelfand, JJ Sninsky, TJ White (Eds.); Academic Press: San Diego, CA, USA, pp. 315–322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1>
- Zervakis GI, Venturella G, Fryssouli V, Inglese P, Polemis E., Gargano ML. 2019. *Pleurotus opuntiae* revisited e an insight to the phylogeny of dimitic *Pleurotus* species with emphasis on the *P. djamor* complex. *Fungal Biology* 123 (3): 188–199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.funbio.2018.12.005>

IDENTIFICACIÓN MOLECULAR Y CARACTERIZACIÓN *in vitro* DE *Pleurotus* spp. EN GUANAJUATO, MEXICO

Socorro Morales-Flores¹, Jonathan Cepeda-Negrete¹, Gerardo Mata-Montes de Oca²,
Arturo Ángel-Hernández¹, Jesús Hernández-Ruiz¹, Jorge Eric Ruiz-Nieto^{1*}

¹ Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato. Irapuato, Guanajuato, Mexico. C. P. 36500.

² Instituto de Ecología A. C. Carretera Antigua a Coatepec No. 351, Col. El Haya, Xalapa, Veracruz. C. P. 91073.

* Autor para correspondencia: jorge.ruiz@ugto.mx

RESUMEN

El consumo de hongos comestibles ha incrementado mundialmente debido a sus propiedades alimenticias y funcionales. En el estado de Guanajuato, México la producción de estos hongos depende de la importación de cepas de distintas especies. Lo anterior, a falta del aislamiento y caracterización de recursos micogenéticos regionales como es el caso del “Hongo del maguey”. El objetivo del estudio fue realizar la identificación molecular, caracterización morfológica y bioquímica antioxidante *in vitro* de una cepa de *Pleurotus* sp. en Guanajuato, México, y compararle con cepas comerciales. La hipótesis planteada se basa en la posibilidad de aislar una cepa regional con características del micelio adecuadas para su cultivo *in vitro*. Se colectó y aisló una cepa silvestre denominada UG-01 de una planta de *Agave mapisaga* y posteriormente se determinó su identidad por la secuenciación de la región ITS1-5.8S-ITS2. La cepa se cultivó *in vitro* y se caracterizó el micelio, como control se incluyeron una cepa experimental y cuatro comerciales. Los resultados se analizaron en un diseño completamente al azar. La cepa del “Hongo del Maguey” se identificó como *Pleurotus djamor*. Con base en el sistema CIE L*a*b se obtuvieron las coordenadas 86.2, -5.6 y -4.1; así como, 33.1 y 21.7 para Hue y Cromo. La cepa UG-01 mostró la mayor tasa de crecimiento con textura algodonosa y sin presencia de exudados. También, presentó la mayor concentración de prolina, compuestos fenólicos y flavonoides, además del menor remanente del radical 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH). Como conclusión, fue posible cultivar *in vitro* el micelio del “Hongo del Maguey”, el cual mostró mejores características morfológicas y bioquímicas antioxidantes respecto a las cepas comerciales importadas.

Palabras clave: Hongos comestibles, análisis de imágenes, crecimiento micelial, antioxidantes.

Citation: Morales-Flores S, Cepeda-Negrete J, Mata-Montes de Oca G, Ángel-Hernández A, Hernández-Ruiz J, Ruiz-Nieto JE. 2022. *In vitro* molecular identification and characterization of *Pleurotus* spp. strains in Guanajuato, Mexico. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2780>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 29, 2021.
Approved: March 07, 2022.
Estimated publication date:
April 26, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 294-315.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCCIÓN

El género *Pleurotus* representa uno de los grupos de hongos comestibles cultivados más importante a escala global, ya que ocupa el segundo lugar en producción y constituye el 19 % de la producción con 6.46 x 10⁶ toneladas anuales a nivel mundial. Es

conocido por ser un eficiente degradador de una gran cantidad de desechos lignocelulósicos y por producir basidiomas comestibles con altas cualidades nutraceuticas y organolépticas, además de vitaminas, minerales y algunos aminoácidos esenciales (Musieba *et al.*, 2013).

Por lo anterior, los basidiomas de este género se consideran un alimento funcional. Además, poseen propiedades antioxidantes (Huaping *et al.*, 2019), antibióticas, antitumorales (Al-Saffar *et al.*, 2020), antiinflamatorias y antimicrobianas (Bains *et al.*, 2020). De los extractos de este hongo se han aislado compuestos activos, los cuales son utilizados en el tratamiento de diversas enfermedades crónico-degenerativas. Las especies de *Pleurotus* tienen aplicaciones en el área de farmacología, industria alimentaria, ciencias ambientales y nutrición (Chaurasia *et al.*, 2020).

En el país, la producción de *Pleurotus* a nivel industrial se realiza con cepas de procedencia extranjera (León-Avendaño *et al.*, 2013). Sin embargo, existen recursos genéticos nativos que representan una amplia base genética con potencial para la producción y obtención de metabolitos secundarios biológicamente activos y que se pueden adaptar a las condiciones ambientales de las regiones áridas, como es el caso de la especie conocida como “Hongo del Maguey” (*Pleurotus* sp.), que crece de forma silvestre sobre la necromasa de plantas de agave pulquero.

Este tipo de hongos son apreciados y comercializados en localidades del centro del país debido a su buen sabor (Barrales y Mata, 2016). La presencia de este hongo se ha reportado en las zonas semi-áridas del centro de México, pero existe la posibilidad de que su distribución sea más amplia debido que el género *Agave* es típico de los ecosistemas áridos y semiáridos de México, mismos que abarcan aproximadamente el 60 % del territorio nacional (Montaño *et al.*, 2016).

El género *Pleurotus* representa una amplia variabilidad genética por lo que los caracteres morfológicos a nivel de cultivo *in vitro* podrían contribuir a una caracterización más completa de los organismos. Estas características además se pueden utilizar como un parámetro de selección para la obtención de cepas más productivas (Cardoso *et al.*, 2017). La gran mayoría de los estudios que informan sobre las propiedades de los hongos se llevan a cabo con los cuerpos fructíferos. Sin embargo, estos compuestos también están presentes en el micelio. La hipótesis planteada se basa en la posibilidad de aislar una cepa regional con características del micelio adecuadas para su cultivo *in vitro*. El objetivo del presente estudio fue realizar la identificación molecular, caracterización morfológica y bioquímica antioxidante *in vitro* de una cepa de *Pleurotus* sp. en Guanajuato, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta y aislamiento

Se aisló una cepa de *Pleurotus* sp. de una planta adulta de *Agave mapisaga* en el Centro Nacional de Agaves de la Universidad de Guanajuato. El hongo colectado se encontró de manera silvestre en la localidad del Copal, Irapuato, Guanajuato, sitio ubicado en las coordenadas 20° 40' 22" N, 101° 20' 53" W, a 1715 de altitud. El clima es semicálido

subhúmedo con lluvias en verano ACw, con temperaturas que oscilan entre 12 a 26 °C, precipitación media anual de 716 mm, y la vegetación que predomina es matorral xerófilo. Se colectó un ejemplar y se colocó en un recipiente previamente desinfectado. El carpóforo se desinfectó con 2 % NaClO por 1 min y posteriormente se enjuagó con agua destilada estéril. El micelio se aisló de forma vegetativa realizando cortes de 1 cm² de la parte media del cuerpo fructífero.

Para su cultivo *in vitro*, se empleó medio agar papa dextrosa (PDA) en cajas Petri con un volumen de 95.4 cm³. Las cajas inoculadas se incubaron 25 °C en completa oscuridad. Posteriormente se realizaron varios subcultivos hasta obtener cultivos puros. Como control, se incluyó la cepa IE-837 donada por el Instituto de Ecología A. C. (Barrales y Mata, 2016) y cuatro cepas introducidas que se producen y comercializan en la región, se identificaron como GR-1, BR-1, BL-1 y BL-2.

Caracterización micelial

A partir de los cultivos *in vitro*, se determinó el crecimiento micelial (CM; cm día⁻¹) transfiriendo fragmentos de micelio de 1 cm de diámetro a cajas Petri con medio PDA recién preparado y se incubaron a 25 °C. Posteriormente, se registró el crecimiento a los 6 días con base en la medición de las distancias bidimensionales en los ejes (*x*, *y*) previamente trazados desde el centro de cada caja. La Tasa de Crecimiento (TC; cm día⁻¹) se determinó mediante la fórmula establecida por Benítez *et al.* (2007). Cuando el micelio cubrió totalmente el medio, se obtuvieron imágenes digitales en condiciones controladas y homogéneas, utilizando una caja de interior blanco con iluminación LED blanca constante.

Las imágenes se obtuvieron mediante una cámara digital a color de la marca Nikon W150 de 13 Mega pixeles, con resolución HD de 1400 x 720 pixeles. Las imágenes se tomaron con una distancia de 9.5 cm entre la lente y los cultivos, y se analizaron mediante un algoritmo de reconocimiento específicamente diseñado para el presente estudio utilizando el software MATLAB R2019a del fabricante MathWorks®. El color de las muestras se determinó mediante el sistema CIE L*a*b, para posteriormente calcular ángulo Hue e índice Croma. Con base en la saturación de pixeles, se determinó la densidad del micelio (DEN; g cm⁻³).

La textura (TEX) se analizó utilizando las claves visuales descritas por Carreño-Ruiz *et al.*, (2013), así como la presencia y/o ausencia de exudados (EXU). Respecto a la caracterización bioquímica del micelio se determinó la concentración de prolina (PRO; µg mL⁻¹) por la reacción de este aminoácido con 2,2-DihydroxiIndeno-1,3-diona, la medición espectrofotométrica se realizó a 517 nm. La concentración de compuesto fenólicos (CF; µg mL⁻¹ de ácido gálico) se realizó por espectrofotometría a 750 nm con base en la formación del complejo fosfotúngstico-fosfomolibdeno. Tanto para PRO como CF, la cuantificación se realizó con curvas de calibración (*r*²>0.99).

La actividad antioxidante se analizó mediante los radicales 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) y 2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS). Las absorbancias se determinaron por su medición espectrofotométrica a 515 y 754 nm, respec-

tivamente. Para ambas determinaciones los resultados se reportaron como porcentaje de radical remanente.

Identificación molecular

Muestras de micelio de cada cepa se cultivaron en medio PDA. A partir del micelio recuperado se realizó la extracción de ADN genómico, siguiendo la metodología descrita por Gómez-Luna *et al.* (2012). La integridad de las muestras se evaluó por electroforesis en gel de agarosa 1 % con solución TBE 1X que se tiñó con GelRed® (Biotium). La pureza se determinó por espectrofotometría y las concentraciones se normalizaron a 200 ng μL^{-1} . Posteriormente, se amplificó por PCR la región ITS1-5.8S-ITS2 empleando los iniciadores ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') e ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') (White *et al.*, 1990).

Las amplificaciones se realizaron con el kit MyTaq™ Mix (Bioline), utilizando reacciones de 50 μL conteniendo 200 ng de ADN, 20 μM de cada iniciador y 50 μL del Mix 2x. Las condiciones de reacción consistieron en 30 ciclos de desnaturalización a 95 °C por 5 min, alineamiento a 51 °C por 30 s y síntesis a 72 °C por 1 min; seguido de una extensión final a 72 °C durante 10 min. Los productos de PCR se secuenciaron por tecnología capilar utilizando el método Sanger *et al.* (1977). Se utilizó el kit BigDye® Terminator v3.1 (Applied Biosystems) y la plataforma ABI 3730xl (Applied Biosystems). La identidad de las secuencias se determinó por comparación en la base de datos GenBank con la opción BLAST 1.17. Se realizaron alineamientos entre las secuencias obtenidas mediante el software Clustal W 2.1, el árbol filogenético se construyó utilizando con el software FastTree 2.1.8 y el método de unión de vecinos (Saitou y Nei, 1987).

Análisis estadístico

Los datos cuantitativos (CM, TC y DEN) se analizaron en un diseño completamente al azar con cinco repeticiones realizando pruebas de separación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$). En el caso de las variables cualitativas TEX y EXU, los resultados se analizaron en un diseño completamente al azar con 10 repeticiones mediante la prueba de Kruskal-Wallis. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Minitab® 16.2.3 (Minitab, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción del ambiente

El “Hongo del Maguey” se encontró en la necromasa de plantas de *Agave mapisaga* en los meses de septiembre a diciembre. Barrales y Mata (2016) encontraron *Pleurotus opuntiae* creciendo en plantas *Agave salmiana* Otto en un clima semiseco templado BS1k a 2340 msnm y una temperatura de 12-14 °C.

Caracterización morfológica *in situ*

El ejemplar colectado presentó las siguientes características morfológicas: píleo liso de 80 a 125 mm, himenio con pliegues, inserción de las láminas decurrentes, margen ondulado, estípite excéntrico o sin estípite, esporada blanca, no presentan volva ni anillo.

Estudios filogenéticos recientes reportan que en México crecen *P. agaves*, *P. opuntiae* y *P. djamor* (Zervakis *et al.*, 2019). El hongo encontrado en plantas de maguey ha sido clasificado morfológicamente por algunos autores como *Pleurotus opuntiae* (Durieu et Lév.) (Camacho *et al.*, 2012).

Identificación molecular

Se obtuvieron productos de PCR de 600 a 650 pares de bases (bp) con los oligonucleótidos ITS1-ITS4, la cepa colectada UG-01 se identificó como *Pleurotus djamor* con una máxima identidad de 99.3 % ($E < 0.0$) con la accesión KX573927. La cepa IE-837 (Barrales y Mata, 2016) se identificó como *Pleurotus flabellatus* con una máxima identidad de 99.8 % ($E < 0.0$) con la accesión MF459667.1. La cepa comercial BL-1 correspondió en un 98.7 % ($E < 0.0$) a *Pleurotus ferulaginis* con la accesión MF076894.1, mientras que las cepas BL-2 (99.8 %, $E < 0.0$, LT627806.1), BR-1 (98.6 %, $E < 0.0$, KY686275.1) y GR-1 (99.2 %, $E < 0.0$, LC602510.1), fueron identificadas como *Pleurotus ostreatus*. Esta es una de las especies de mayor importancia económica en el país, es importada de Europa (Zervakis *et al.*, 2019), Asia y el Norte de América.

La especie *Pleurotus djamor* es de distribución pantropical (Salmones, 2017), en México se ha colectado en zonas tropicales y subtropicales del sur (Chiapas, Tabasco y Yucatán), centro (Puebla y Morelos), oeste (Jalisco y Michoacán) y este (Veracruz), crece en troncos y ramas muertas de diversas especies arbóreas y arbustos.

El árbol filogenético muestra que la cepa UG-01 se encuentra en un grupo independiente lo que indica que se encuentra emparentada más lejanamente a las otras cepas, también indica que las cepas comerciales BL-2 y BL-1 comparten un reciente ancestro común al igual que la cepa BR-1 y GR-1 (Figura 1), las cepas comerciales se encuentran igualmente emparentadas a la cepa silvestre IE-837.

Caracterización morfológica *in vitro*

Se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la luminosidad (L), con valores que van de 86.2 a 87.6, correspondiendo el valor más alto a la cepa IE-837. Respecto a la coordenada a^* se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.01$), los valores negativos indican tonos de color verde, siendo las cepas BL-1 y BR-1 las que se ubicaron en este espacio (Cuadro 1).

En la coordenada b^* se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), los valores negativos de b^* se ubican en el color azul, la cepa que presentó pigmentos en este color fue la GR-1 con un valor de -4.6. En el caso de índice Hue se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) con valores entre 33.1 a 38.5. En el caso del índice Hue valores de 0 a 90 indican una tendencia que va paulatinamente del rojo a una combinación con el amarillo hasta definirse este último. El color se relaciona con la presencia de algunos metabolitos secundarios, los compuestos fenólicos presentan colores como el rojo, rosa, azul o púrpura, mientras que algunos flavonoides tienen colores en tonos de blanco amarillento (Gülçin, 2012).

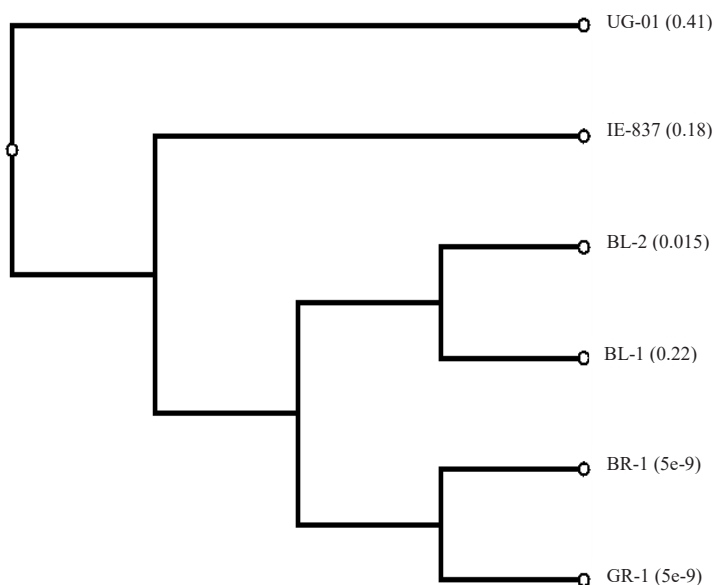


Figura 1. Árbol filogenético de especies de *Pleurotus* spp. IE-837: cepa donada, *P. flabellatus*, UG-01: cepa colectada, *P. djamor*, BL-2: cepa comercial, *P. ostreatus*, BL-1: cepa comercial, *P. ferulaginis*, BR-1: cepa comercial, *P. ostreatus*, GR-1: cepa comercial *P. ostreatus*.

Hasta el momento la mayoría de los estudios utilizan claves o referencias visuales para determinar el color por comparación, según este método la especie *Pleurotus djamor* presenta un micelio color blanco o amarillento (León-Avendaño *et al.*, 2013).

El análisis de imágenes de los micelios permitió diferenciar variaciones en el color que corresponderían a una composición bioquímica también diferente (Figura 2).

Cuadro 1. Características morfológicas evaluadas en el micelio de las cepas de *Pleurotus* spp.

Variables	UG-01	IE-837	BL-1	BL-2	BR-1	GR-1
<i>Cuantitativas</i>						
L	86.2 b	87.6 a	86.9 ab	87.0 ab	87.2 ab	86.8 ab
a	-5.6 bc	-5.0 ab	-5.7 c	-5.2 a	-5.7 c	-5.4 abc
b	-4.1 ab	-4.1 ab	-3.9 a	-4.2 ab	-4.5 ab	-4.6 b
Croma	21.7 a	22.3 a	23.9 a	20.3 a	21.2 a	22.4 a
Hue	33.1 b	37.5 ab	36.5 ab	36.8 ab	34.0 ab	38.5 a
CM	4.0 a	2.2 d	3.8 ab	3.3 c	3.9 ab	3.7 b
TC	0.9 d	0.3 a	0.7 c	0.4 b	0.6 c	0.6 c
DEN	0.988 ab	0.986 ab	0.985 b	0.989 ab	0.989 ab	0.990 a
<i>Cualitativas</i>						
TEX	Algodonosa	Algodonosa	Zonada	Zonada	Zonada	Zonada
EXU	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

Variables: L: Luminosidad, a: coordenadas rojo-verde, b: coordenadas amarillo-azul, Croma: saturación, Hue: tonalidad, CM: crecimiento micelial (cm día⁻¹), DEN: densidad (g cm⁻³), TC: tasa de crecimiento (cm día⁻¹), TEX: textura, EXU: exudados. Medias con letras distintas dentro de las filas indican diferencias significativas entre micelios evaluados (Tukey; $p \leq 0.05$).

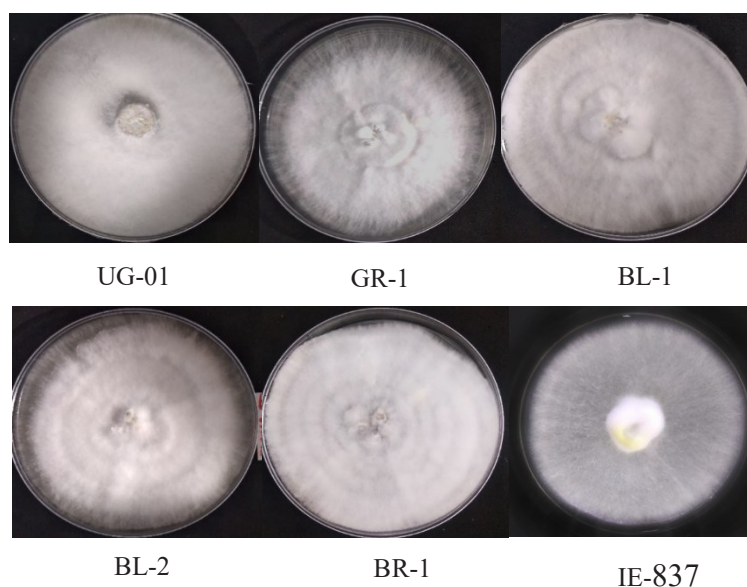


Figura 2. Color de las diferentes cepas del género *Pleurotus* determinadas por un sistema de análisis de imágenes mediante las coordenadas L^*a^*b y el índice C y Hue, aisladas y conservadas en cultivo PDA.

En cuanto al CM se identificaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.01$), la cepa UG-01 cubrió el 100 % del área de la caja Petri a los 6 días, en general las cepas comerciales tuvieron un crecimiento similar, mientras que la IE-837 cubrió el 55 % en el mismo tiempo mostrando un crecimiento más lento, esta diferencia puede deberse a que esta cepa procede de un lugar a 2,345 msnm donde la temperatura promedio es de 12-14 °C. Ahmad *et al.* (2015) reportó que el crecimiento de *Pleurotus djamor* se dio en 5.25 días. La diferencia en el crecimiento micelial se relaciona con el tipo de enzimas presentes en cada especie y su capacidad de aprovechar las fuentes energéticas.

En la TC se presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) con un intervalo de crecimiento diario de 0.3 a 0.9 cm día⁻¹, la cepa UG-01 superó el crecimiento de las cepas comerciales (GR-1, BR-1, BL-1, BL-2); la TC menor la presentó la IE-837 (0.3) (Cuadro 1). Aguilar-Pumahuilca *et al.* (2019) reportaron para *P. djamor* una tasa de crecimiento superior de 1.09-1.14 cm día⁻¹ en medio de cultivo PDA.

Es importante considerar que una rápida velocidad de crecimiento micelial en el medio de cultivo favorece la reducción de los ciclos de cultivo en el proceso de producción y a disminuir el arribo de contaminantes. La cepa colectada presenta potencial para ser cultivada *in vitro* ya que responden de manera positiva a la temperatura, siendo este un factor muy importante. El cultivo de *Pleurotus* en el estado de Guanajuato ha tenido un desarrollo limitado debido a que se utilizan cepas comerciales importadas que crecen y fructifican a temperaturas templadas.

Las cepas evaluadas mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en la DEN, la cepa GR-1 es la que presentó mayor densidad con un valor de 0.989 g cm⁻³. La cepa UG-01

presentó una densidad regular con presencia de un micelio rastrero, escaso, distribuido de manera homogénea. En condiciones favorables, los hongos incrementan la ramificación de sus hifas y, por consiguiente, la cantidad de biomasa, aumentando la eficiencia de suministro de nutrientes al incrementarse su área superficial, la densidad alta se distingue por la presencia de un micelio aéreo, abundante y distribuido de manera homogénea.

León-Avendaño *et al.* (2013) reportan que las cepas de *Pleurotus djamor* presentan densidad alta, lo que coincide con los resultados del presente estudio. Respecto a la TEX se identificaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.01$). Las cepas comerciales GR-1, BL-1, BR-1 y BL-2 desarrollaron textura zonada, característica que puede ser una respuesta quimiotrófica inducida por el gradiente de nutrientes en el medio y la temperatura de incubación; mientras que, las cepas silvestres IE-837 y UG-01 presentaron textura algodonosa. Por su parte, Acosta-Urdapilleta *et al.* (2016) refieren que las cepas de *Pleurotus* spp. pueden presentar textura algodonosa, aterciopelada o lanosa. Respecto a la presencia de exudados (EXU), no se identificaron diferencias significativas ($p > 0.05$).

Las especies *Pleurotus djamor* y *Pleurotus albidus* presentan exudado de color café claro o ámbar en medio PDA, lo que está relacionada con el metabolismo secundario y la síntesis de diversos compuestos químicos como respuesta natural de supervivencia (Carreño *et al.*, 2013).

En cuanto a la caracterización bioquímica del micelio se identificaron diferencias significativas entre cepas ($p \leq 0.01$). La cepa UG-01 mostró los niveles más altos de prolina ($57 \mu\text{g mL}^{-1}$) debido a que es posible que haya desarrollado adaptaciones que le permiten sobrevivir en condiciones hídricas mínimas y continuar con el ciclo biológico. La limitación hídrica es característica del estado de Guanajuato en donde se aisló cepa UG-01. La acumulación de prolina actúa como agente osmótico para proteger al micelio de la desecación.

Las diferencias en CF también fueron significativas entre cepas ($p \leq 0.01$). La cepa UG-01 presentó el valor más alto ($362.0 \mu\text{g mL}^{-1}$ de ácido gálico). Las cepas BL-2, GR-1 y BR-1 identificadas como *P. ostreatus* presentaron valores estadísticamente distintos, lo cual puede deberse a que los diferentes aislamientos de una misma especie pueden producir metabolitos secundarios significativamente diferentes que conllevan a la individualidad de las especies y que dependen de sus características genéticas.

Ferrer-Romero *et al.* (2019) reportaron que el micelio de *P. ostreatus* presenta diversidad de compuestos fenólicos, los cuales varían según los factores genéticos y las condiciones de cultivo. Vamanu, (2014) reportó una concentración de 35.4 mg g^{-1} de ácido gálico en el micelio de *P. ostreatus*. Igualmente, se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en FLA con valores que van desde 30 a 69 mg mL^{-1} (Cuadro 2). En micelio de *P. ostreatus* se han reportado valores totales de 28.0 (Vamanu, 2014) y 4.4 mg EQ g^{-1} (Ćilerdžić *et al.*, 2015) en extracto etanólico. Los hongos contienen flavonoides como la naringenina, la rutina, la morina y el resveratrol. Finalmente, la cantidad y variedad de compuestos también depende de la especie de hongo.

Se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en la capacidad antioxidante usando tanto el radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) y ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin)-6-sulfónico (ABTS). Las absorbancias se determinaron como ABTS. En el caso del primero, las cepas UG-01 (20.8 %) y BL-2 (23.3 %) mostraron los porcentajes más bajos de remanente del radical; mientras que, la cepa IE-832 presentó el porcentaje más alto (78.6 %), lo que indica la tasa más baja de actividad antioxidante. Vamanu (2012) indicó que la actividad depuradora de DPPH a una concentración máxima de 20 mg mL⁻¹ osciló entre 58.8 y 89.9 % con extracto etanólico de micelio de *Pleurotus ostreatus*. Oropeza-Guerrero *et al.* (2018) reportaron una concentración inhibitoria media máxima de 10.76 ± 0.27 mg mL⁻¹ en la reducción del radical DPPH, en el micelio de *Pleurotus djamor* var. Roseus. Islas-Santillán *et al.* (2017) indicaron una correlación positiva entre la concentración de polifenoles y la actividad antioxidante en el género *Ganoderma*.

En cuanto al radical ABTS, las cepas que presentaron mayor actividad antioxidante fueron BL-2, BR-1 y UG-01 con valores de 23.3, 26.5 y 28.5 %, respectivamente (Cuadro 2). La actividad neutralizadora de los radicales libres DPPH y ABTS, está ligada en un 62.4 % al contenido total en compuestos fenólicos (Rivas-Mena *et al.*, 2015). Vamanu (2012) concluyó que los extractos de micelio de *Pleurotus* se pueden utilizar como una rica fuente de antioxidantes en productos de tipo farmacéutico. Esto debido a que un grupo importante de compuestos antioxidantes presentes en dicho hongo reaccionan mediante la transferencia de radicales de hidrógeno y la transferencia de electrones.

CONCLUSIONES

La cepa colectada UG-01 del "Hongo del Maguey" se identificó como *Pleurotus djamor*. En el cultivo *in vitro* esta cepa presentó un mayor crecimiento micelial y capacidad antioxidante respecto a cepas importadas cuyo micelio se utiliza en la producción comercial.

Cuadro 2. Variables bioquímicas antioxidantes evaluadas en el micelio de las cepas de *Pleurotus* spp.

Variable	UG-01	IE-837	BL-1	BL-2	BR-1	GR-1
PR	57.0 a	54.0 c	56.0 b	56.0 b	56.0 b	56.0 b
CF	362.0 a	94.0 e	246.0 d	342.0 ab	327.0 bc	305.0 c
FLA	69.0 a	30.0 d	35.0 d	64.0 a	57.0 b	48.0 c
DPPH	20.8 e	78.6 a	62.4 b	23.3 e	30.4 d	43.2 c
ABTS	28.5 cd	83.7 a	48.3 b	23.3 d	26.5 d	43.8 bc

Concentración de prolina (PR, µg mL⁻¹), concentración de compuestos fenólicos (CF, µg mL⁻¹ de ácido gálico), concentración de flavonoides (FLA, mg mL⁻¹), actividad antioxidante con base en los radicales remanentes DPPH y ABTS (DPPH, ABRS, %). Medias con letras distintas dentro de las filas son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$).

REFERENCIAS

- Acosta-Urdapilleta ML, Téllez-Téllez M, Villegas E, Estrada A, Díaz-Godínez G. 2016. Caracterización de cinco especies de *Pleurotus* crecidas en cuatro medios de cultivo. Mexican Journal of Biotechnology 1: 1–11.
- Aguilar-Pumahuilca F, Huamán-Huamán H, Holgado-Rojas M. 2019. Caracterización de *Pleurotus* sp. aislado de la comunidad nativa de Korimani, centro poblado de Kiteni-Echarate, La Convencion, Cusco, Perú. Ecología Aplicada 18 (1): 45–50. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v18i1.1305>
- Ahmad I, Fuad I, Khan ZK. 2015. Mycelia growth of pink oyster (*Pleurotus djmour*) mushroom in different culture media & environmental factors. Agriculture and Food Sciences Research 2 (1): 6–11.
- Al-Saffar AZ, NA Hadi, HM Khalaf. 2020. Antitumor activity of β -glucan extracted from *Pleurotus eryngii*. Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology. 14 (3): 2492–249.
- Bains A, Chawla P, Tripathi A, Sadh PK. 2020. A comparative study of antimicrobial and anti-inflammatory efficiency of modified solvent evaporated and vacuum oven dried bioactive components of *Pleurotus floridanus*. Journal of Food Science and Technology 58 (9): 3328–3337. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04891-8>
- Barrales M, Mata G. 2016. Selección de cepas nativas del hongo de maguey (*Pleurotus opuntiae*) y evaluación de su producción en sustratos fermentados. Interciencia 41 (5): 346–352.
- Benítez S, Bentley J, Bustamante P, Sánchez LC, Corrales L. 2007. Aislamiento de los microorganismos cultivables de la rizosfera de *Ornithogalum umbellatum* y evaluación del posible efecto biocontrolador en dos patógenos del suelo. NOVA 5 (008): 147–153. <http://dx.doi.org/10.22490/24629448.383>
- Camacho M, Guzmán G, Guzmán-Davalos L. 2012. *Pleurotus opuntiae* (Durieu et Lev.) Sacc. (Higher Basidiomycetes) and other species related to *Agave* and *Opuntia* Plants in Mexico: taxonomy, distribution, and applications. International Journal of Medicinal Mushrooms 14 (1): pp 65–78. <http://dx.doi.org/10.1615/IntJMedMushr.v14.i1.70>
- Cardoso RVC, Fernandes Â, Oliveira MBPP, Calhella RC, Barros L, Martins A, Ferreira ICFR. 2017. Development of nutraceutical formulations based on the mycelium of *Pleurotus ostreatus* and *Agaricus bisporus*. Food Function 8: 2155. <http://dx.doi.org/10.1039/c7fo00515f>
- Carreño-Ruiz SD, Cappello-García S, Gaitán-Hernández R, Cifuentes-Blanco J, Rosique-Gil JE. 2013. Caracterización del crecimiento micelial in vitro de *Pleurotus albidus* Pegler 1983 y *Pleurotus djamor* Boedijn 1959, en Tabasco, México. Kuxulcab 19: 37–46. <https://doi.org/10.19136/kuxulcab.a19n37.348>
- Chaurasia PK, Shashi SL, Kumar S. 2020. Recent studies on biotechnological roles of *Pleurotus* spp. Journal Biotechnology and Bioprocessing 1: 3. <http://dx.doi.org/10.31579/2766-2314/018>
- Ćilerdžić J, Stajić M, Vukojević J, Milovanović I, Muzgonja N. 2015. Antioxidant and antifungal potential of *Pleurotus ostreatus* and *Agrocybe cylindracea* basidiocarps and mycelia. Current Pharmaceutical Biotechnology 16 (2): 179–186. <http://dx.doi.org/10.2174/1389201015666141202152023>
- Ferrer-Romero JC, Mas-Diego SM, Beltrán-Delgado Y, Morris-Quevedo HJ, Díaz-Fernández U. 2019. Estudio cinético de la producción de biomasa y compuestos fenólicos por *Pleurotus ostreatus* en fase sumergida. Revista Cubana de Química 31 (1): 16–30.
- Gómez-Luna BE, Vázquez-Marrufo G, Herrera-Méndez CH, Hernández Morales A, Olalde-Portugal V. 2012. Utilización de marcadores moleculares para el estudio de hongos basidiomicetes silvestres. Ra Ximhai 8: 131–141.
- Gülçin I. 2012. Antioxidant activity for food constituents: A review. Archives of Toxicology. 86: 345–391. <http://dx.doi.org/10.1007/s00204-011-0774-2>
- Huaping L, Huajie Z, Zheng G, Xinling S, Wenshuai W, Fangfang Y, Feng F, Yiwen Z, Jianjun Z, Shuliang Z, Le J. 2019. The antioxidant and anti-aging effects of acetylated mycelia polysaccharides from *Pleurotus djamor*. Molecules. 24: 2698. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules24152698>
- Islas-Santillán MÁ, Castañeda-Ovando A, Álvarez-Delgadillo A, Valenzuela-Garza R, Romero-Bautista L, Torres-Valencia JM. 2017. Estudio preliminar de la actividad antioxidante de tres especies del género *Ganoderma* (Polyporaceae) nativas del estado de Hidalgo, México. Revista Mexicana de Micología 46: 37–45.
- León-Avendaño H, Martínez-García R, Caballero-Gutiérrez P, Martínez-Carrera D. 2013. Caracterización de dos cepas de *Pleurotus djamor* nativas de Oaxaca, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 6: 1285–1291.

- Minitab. 2010. Minitab 17 Statistical Software. Computer software. State College, PA, USA. Minitab Inc.
- Montaño NM, Ayala F, Bullock SH, Briones O, García-Oliva F, García-Sánchez E, Maya Y, Perroni Y, Siebe C., Tapia-Torres Y, Troyo E, Yépez E. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana* 34: 39–59.
- Musieba F, Okoth S, Mibey RK, Wanjiku S, Moraa K. 2013. Proximate composition, amino acids and vitamins profile of *Pleurotus citrinopileatus* singer: an indigenous mushroom in kenya. *American Journal of Food Technology* 8: 200–206. <http://dx.doi.org/10.3923/ajft.2013.200.206>
- Oropeza-Guerrero MP, Santos-Sánchez NF, Salas-Coronado R, Valadez-Blanco R, Hernández-Carlos B, Guadarrama-Mendoza PC. 2018. Productivity and antioxidant activity of wild, reconstituted, and hybrid strains of the pink oyster mushroom, *Pleurotus djamor* (Agaricomycetes), from Mexico. *International Journal of Medicinal Mushrooms* 20: 607–621. <http://dx.doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.2018026382>
- Rivas-Mena KE, Muñoz DL, Pino-Benítez CN, Balcázar-Morales N. 2015. Actividad antioxidante, contenido fenólico total y citotoxicidad de extractos polares obtenidos de plantas antidiabéticas colombianas. *Revista Cubana de Plantas Medicinales* 20 (3):277–289. <http://revplantasmedicinales.sld.cu/index.php/pla/article/view/162>
- Salmones D. 2017. *Pleurotus djamor*, un hongo con potencial aplicación biotecnológica para el neotrópico. *Revista Mexicana de Micología* 46: 73–85.
- Sanger FG, Air M, Barrell BG, Brown NL, Coulson AR, Fiddes CA, Hutchison CA, Slocombe PM, Smith M. 1977. Nucleotide Sequence of Bacteriophage phiX174 DNA. *Nature* 265: 687–695.
- Saitou N, Nei M. 1987. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*. 4 (4): 406–425. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454>
- Vamanu E. 2012. *In vitro* antimicrobial and antioxidant activities of ethanolic extract of lyophilized mycelium of *Pleurotus ostreatus* PQMZ91109. *Molecules* 17 (4): 3653–3671 <http://dx.doi.org/10.3390/molecules17043653>
- Vamanu E. 2014. Antioxidant properties of mushroom mycelia obtained by batch cultivation and tocopherol content affected by extraction procedures. *Biomed Research International* 1–8. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/974804>.
- White JT, Bruns T, Lee S, Taylor J. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, DH Gelfand, JJ Sninsky, TJ White (eds). *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications*. Academic Press: San Diego, CA, USA. pp: 315–322.
- Zervakis GI, Venturella G, Fryssouli V, Inglese P, Polemis E., Gargano ML. 2019. *Pleurotus opuntiae* revisited e an insight to the phylogeny of dimitic *Pleurotus* species with emphasis on the *P. djamor* complex. *Fungal Biology* 123 (3): 188–199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.funbio.2018.12.005>



GLOBAL FOOD SECURITY AND SOVEREIGNTY IMPACTED BY SARS-CoV-2 PANDEMIC

Magdalena Mendoza-Sánchez^{1*}, Alejandro Espíndola-Ánimas¹, María de Jesús Mendoza-Sánchez²

¹ Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería. Cerro de las Campanas s/n. Querétaro, Querétaro, Mexico. C. P. 76010.

² Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Roque. Carretera Celaya-Juventino Rosas km 8, Roque, Guanajuato, Mexico. C. P. 38110.

*Corresponding author: mendozasan.mag@gmail.com.

ABSTRACT

The current health crisis due to the severe acute respiratory syndrome -coronavirus-2 (SARS-CoV-2) is challenging several of the assumptions of a globalized world. There are severe consequences over food security and sovereignty, especially among the poorest and most vulnerable populations. Particularly, since any infectious disease outbreak is directly correlated to an increase in hunger and malnutrition. This essay is set to analyze the impacts of the sanitary crisis on food security and sovereignty in the international context, and highlight how governments are acting to reduce consequences, through the use of an exploratory and analytical methodology. Although the United States (U.S.) has successfully overcome this health crisis, the food crisis has overtaken, as a result of the growing unemployment. In Latin America, the pandemic is exacerbating food access and economic situation. The sanitary crisis has aggravated food shortages in Africa already going on, especially in rural areas. Asia suffered the most significant impact in food security. The new food security policy in the European Union aims to hold food security. Food insecurity and malnutrition are not just about agriculture production; they are also about food access limitations. In consequence, this health crisis cannot be allowed to become also a food crisis.

Keywords: Pandemic, coronavirus, COVID-19, food security, food sovereignty, socio-economic impacts.

INTRODUCCIÓN

The severe acute respiratory syndrome -coronavirus-2 (SARS-CoV-2) has caused a global crisis (Sohrabi *et al.*, 2020). The severe consequences of this crisis have impacted the world population, especially the poorest and most vulnerable (Sumner *et al.*, 2020). The pandemic-induced economic slowdown has had a significant impact on employment, especially in developing countries. Around 80 % of the labor force was affected totally or partially by workplace closings (Kim *et al.*, 2020). Due to its impact on the food and agriculture sectors, it is essential to safeguard the continuousness of the food supply chains at national and international levels. The global food system is now tested, since it has been under pressure in the past year and perhaps the following years (FAO, 2020a). Agriculture is important in human development and

Citation: Mendoza-Sánchez M, Espíndola-Ánimas A, Mendoza-Sánchez MJ. 2022. Global food security and sovereignty impacted by SARS-CoV-2 pandemic. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2719>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: July 08, 2021.
Approved: February 27, 2022.
Estimated publication date:
March 07, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 316-358.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



is close related to food security (Poudel *et al.*, 2020). Any infectious disease outbreak is directly correlated to an increase in hunger and malnutrition (Headey *et al.*, 2020). According to the Food and Agriculture Organization (FAO), the world is confronting a difficult challenge in terms of transport logistics, since the countries cannot take food from one point to another due to mobility restrictions. Regarding farms and food industry workers, they might avoid engaging in agriculture tasks and food processing, causing labor shortages for the harvest and difficulties to bring food to the market (FAO, 2020b). As a result, it has been reduced the production of high-value foods, such as: fruits, vegetables and processed food (Swinnen and McDermott, 2020).

The closure of restaurants and the low purchase frequency in grocery stores reduce the demand for fresh and fishery products, affecting producers and suppliers (OECD, 2020a). The agriculture, fishing and aquaculture sectors are affected by tourism restrictions (FAO, 2020c), and the suspension of school activities (FAO, 2020a).

Although the vaccination is already available in most of the countries, the world is far from getting the level of immunity needed to be wholly safe. So that the outlook is not encouraging for both developing and undeveloped countries (Wouters *et al.*, 2021). Therefore, every country must generate strategies to allow food sovereignty, strengthen food production and its distribution system, while considering the most vulnerable population with higher relevance.

The hypothesis is that the sanitary crisis is affecting economic and social aspects around the world resulting in a food crisis, especially in vulnerable areas. Information analysis is required to identify the impacts of the sanitary crisis on food security and sovereignty in the international context. Hence, this research aims to contextualize how food security and sovereignty are being affected by the spread of the SARS-CoV-2 disease and what are doing some governments to reduce its impact.

MATERIALS AND METHODS

Exploratory and analytical technics were used in three main steps: 1) Structure design, 2) Systematic literature search and information analysis, and 3) Review redaction.

In order to design the structure of this review, team members had a reunion to justify the need of the research and to formulate the principal questions and the objectives of the investigation; concluding that this pandemic, as have happened with other sanitary crisis, has exacerbated the risk to security and sovereignty of food, especially in vulnerable areas in the world.

The search was performed (January 2020 - February 2022) to process the information from the following databases: ScienceDirect, Elsevier, Springer and International Organization reports. Also, the information was constrained to a timeframe, the previous ten years.

The Systematic literature search and information analysis were carried out using the following search cycle (Figure 1).

The used method involved a regular investigation and tracking the source information in detail using a spreadsheet; the information was categorized by world region, development status; socioeconomic, food security and sovereignty impacts;

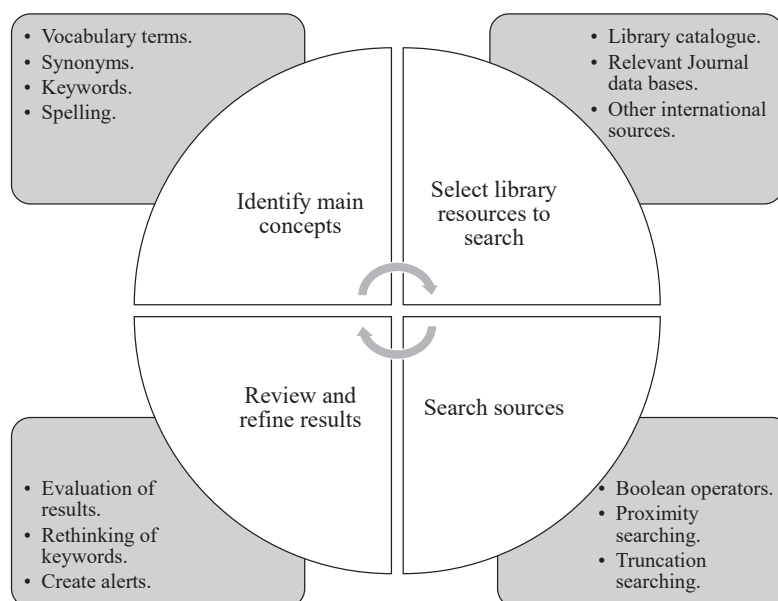


Figure 1. Search cycle (Charles Stuart University, 2018).

vaccination level and government actions. The information was organized this way to allow the analysis by region and the comparison between them following this search cycle.

Food security and sovereignty in the world

According to the FAO, “Food Security exists when all people, at any time, have physical and economic access to sufficient, safe and nutritious food that meets their dietary needs and food preferences for an active and healthy life” (FAO, 2020d). This concept is multidimensional, since it includes: the stability over time of food availability, its economic access and its biological uses. While, the term “Food Sovereignty” is defined as: “the right of peoples to healthy and culturally appropriate food produced through ecologically sound and sustainable methods, and their right to define their food and agriculture systems” (Gordillo and Jeronimo, 2017). This term puts the aspirations and needs of those who produce, distribute and consume food at the heart of food systems and policies rather than the demands of markets and corporations.

Thus, the fundamental difference between “Food Security” and “Food Sovereignty” consists in the definition of the mechanisms through which the food supply must be ensured. While food security privileges productivism and international trade for food availability, food sovereignty proposes agroecological practices; short production and distribution circuits; as well as respect for cultural, genetic and ecosystem diversity. Therefore, governmental and non-governmental worldwide organizations should have both, food security and sovereignty, as main objectives, especially in poorest countries and areas threatened by war or climate change. As data shows, SARS-CoV-2

pandemic has put at risk both of them, food security and sovereignty, all over the world, especially in those areas under critical conditions. Hence, food equity must be ensured, through efficient systems of production and distribution from the reserves and international markets (UN-WFP, 2020a).

World trade restrictions have triggered shortages and elevate the prices of food items; similarly, travel limitations, interrupted flight operations, frontier closures and labor shortages have disrupted the food supply chains, which are essential to ensure stability in the supply (FAO, 2021).

Due to closures of workplaces, schools and restaurants, the demand of some daily products, such as perishable food, has been reduced, causing scarcity in some regions and food waste in others. Consequently, there is a gap to bridge between food waste and hunger.

The SARS-CoV-2 pandemic resulted in mass unemployment. Given the close relationship of poverty and food security, social protection measures must be prioritized to protect the vulnerable, especially the informal economy. A report from the U.S. Bureau of Labor Statistics shows that in march 2021, the economy added 916,000 jobs in the U.S. However, a large number of workers continue to file for unemployment compensation. The same situation occurs in other countries, so that the global economy recovery is uncertain, especially due to recent virus outbreaks in many regions.

Prior to the current pandemic, there were 820 million persons with no access to food; 2 billion individuals malnourished, and 700 million people lived under the poverty line (IFAD *et al.*, 2019). Projections are that 100 million people could need humanitarian assistance in the following years, and this number can rise if multilateral actions are not taken (UN-WFP, 2020a).

North America facing SARS-CoV-2 pandemic

Agri-food chains in North America, especially in the United States (U.S.) and Canada, have been distinguished for being highly efficient. Nevertheless, the first year of the pandemic exposed a surprising food chain vulnerability due to the near-total temporary loss of the foodservice distribution channel due to workforce outbreaks by SARS-CoV-2, which shows that special attention should be paid to how an unexpected crisis can cause harsh effects on food security. However, this continent region managed to quickly overcome the effects of the pandemic with prices and production levels similar to those typically observed in years prior to the pandemic (Weersink *et al.*, 2021).

Furthermore, the demand shifted away from foodservice to food retail, but the systems that have evolved to deliver food at the lowest cost to these end-users could not adapt quickly enough to such significant shock. Other structural changes will be felt through input markets, most notably labor, as the tendency to greater automation will continue to accelerate as a response of not having healthy and productive workers. Also, the economic fallout induces changes in consumer food-buying behavior, ranging from online shopping and increasing purchases from local suppliers (Weersink *et al.*, 2021).

United States is already facing the SARS-CoV-2 impact

Early March 2020, when the pandemic effects were developing, the United States Government pronounced self-confidence on food security, based on three main input sources: domestic production, imports and storage (USDA, 2020).

In accordance with a forecast of the U.S. Department of Agriculture (USDA), the domestic production of agricultural commodities would be sufficient, since red meat production for 2020 was about 56.7 billion pounds, 3 % higher than 2019, while production of poultry meat was 51.6 billion pounds, 2 % more than 2019. Production of eggs and milk was also higher in 2020 compared with 2019. In addition, an USDA report on commodities in cold storage showed that at the end of February, total red meat in freezers was 5 % higher and chicken was 6 % more than the previous year. About cereals, wheat production in 2019/2020 was a little more than 2 % from last harvest season. Wheat supplies, particularly for bread wheats, was plentiful.

Regarding food importation, USDA reported that the forecast suggested that even countries heavily affected by SARS-CoV-2 spread would continue shipping food products and that there would be no immediate risks of massive disruptions in the global supply chain. There were food importations that accounted higher shares, such as fruits, nuts and some meat cuts, importations (USDA, 2020)

However, the economic downturn caused by the SARS-CoV-2 pandemic has already led to devastating consequences, since the current information shows that the U.S. are having a recession not seen since the Great Recession of 2007. Tens of millions of people have lost their jobs or reduced their hours worked, increasing poverty (Wolfson and Leung, 2020). Feeding America, the largest domestic hunger-relief organization, studied the impact of SARS-CoV-2 on food security, and they projected that 1 of 9 persons will experience food insecurity in the following years. This study also projected that 21 % of black individuals (1 out of 5) may experience food insecurity all 2021, compared to 11 % of white individuals. In response to this problem, the administration of the current president and the U.S. Department of Agriculture (USDA) have proposed several actions that will be carried out to ensure nutritious food.

Due to restrictions, access to food is also an element that has been impacted. Another strategy to address this will be implemented to improve the access to online purchasing, increasing the food access. Currently, USDA expands the SNAP Online Purchasing Pilot beyond the original 8 states. More than 1.5 million households in 46 states and Washington D.C. are using their SNAP benefits to purchase. Additionally, it is contemplated an increased support to U.S. territories, such as Samoa and Puerto Rico.

In addition, the nutritional supports that were already given in the schools to the students were maintained and increased. A health and nutrition program for young mothers and their children is also being supported, as well as nutritional support for students with difficulties and populations of young people living on the streets that were not previously contemplated (USDA, 2021).

Central America and Mexico

Central America and Mexico include the subtropical and tropical regions of the North American continent and comprise Mexico, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica and Panama. The region has some of the largest, most productive, and technical agricultural systems, livestock feeding operations, intensive horticultural production systems for domestic consumption and export, and some highly marginalized, resource-limited subsistence agri-food systems. Nevertheless, some regions of these countries are among the poorest in the world (Lopez-Ridaaura *et al.*, 2021).

The international trade agreements in the region and the non-traditional agricultural production have led to the migration of young people to urban areas and the United States; at the same time, they have created a massive inflow of remittances to rural areas. However, the incidence of rural poverty has not changed, especially among indigenous populations, nor the unequal distribution of land. Costa Rica stands out with the most equitable land distribution compared to Guatemala, the unequal country land (Lopez-Ridaaura *et al.*, 2021).

However, the SARS-CoV-2 pandemic has affected the agri-food sector in the region, principally due to high infection rates, reduced mobility, decreased labor availability, disruption of the financial services, packaging-distributions facilities disrupted, contraction of national/international markets, delays in imports and exports.

Agri-food system inputs, such as: fertilizers, seeds, veterinary medicines and animal feed, became scarce and expensive when available in the region. Farmers in Southern Mexico reported that reduced mobility made it difficult to reach input shops. In Guatemala, producers of basic grains and vegetables saw an increase in the costs of agricultural inputs. In Honduras, producers stated that the retention of inputs in customs had created difficulties in maintaining their production, to mention just a few examples (Lopez-Ridaaura *et al.*, 2021).

SARS-CoV-2 disrupts economies and food systems everywhere, but the poor suffer the most significant risk of food crisis. As can be seen in the North American continent, the risk of increased food insecurity depends on economic development. As employment and income opportunities fall for the poor, the gap between rich and poor grows.

Latin America and the Caribbean from a weaker position

Prior to the current pandemic, the Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), expected a 1.3 % of GDP grow in 2020. However, the health crisis has led to a GDP drop of at least 1.8 %. Further pandemic effects are forecasted as a reduction of more than 3 %.

The CEPAL (2020) stated that sanitary crisis affects the region through five main external channels: First, decline in the economic activity of its main trading partners, since the region dependent on several exports, the volume and value of which will be reduced by the global recession.

Second, price decay in primary products, due to the global demand contraction, particularly from China, the largest consumer and importer of primary products, will affect the exporters countries principally.

Third, interruption of global value chains, starting with Chinese suppliers and then European and American (USA) production, mainly affecting Mexico and Brazil, whose manufacturing sectors are the largest in the region.

Fourth, lower demand for tourism services due to travel restrictions. The tourism activity in the Caribbean has contracted more than 25 % in this area. The most affected countries are those island countries which economy depends on tourism, such as: Antigua and Barbuda, Belize, Barbados, Dominica, Guyana, Grenada, Haiti, Jamaica, Saint Kitts and Nevis, Saint Lucia, Saint Vincent and The Grenadines, Suriname, and Trinidad and Tobago (UNECLAC, 2020).

Fifth, is the increased risk aversion and worsening global financial conditions. Current lower demand for the financial assets of the region and significant depreciation of the currencies.

These social and economic effects of the pandemic in Latin America and the Caribbean are a threat to achieve food security. Besides, in recent years, food security in the region has been deteriorated, now on the sanitary crisis worsens the situation (FAO, 2020d). In South America, the prevalence of hunger in 2020 was 7.8 %. Between 2014 and 2020, hunger rose from 3.8 % to 7.8 % in South America, with an increase of 4 % over six years. It is important to mention that half of this increase occurred during the last year, in the context of the SARS-CoV-2 pandemic, taking the prevalence of undernourishment in South America to its highest level since 2007 (IFAD *et al.*, 2019; FAO *et al.*, 2021).

The pandemic impact over food systems and food security in the CELAC countries has varied, depending on the health policies and strategies established, the productive and commercial structures, the degree of income inequity and external factors related to energy and credit markets, or exchange rates (Figure 2), (FAO, 2020d).

Regarding the food demand, the pandemic is impacting the economic access of families. The economic decrease in the region has led to an increase in the unemployment rate from 8.1 % to 11.5 %, affecting the population whose income is necessary to acquire basic goods and elementary services (FAO, 2020d). The sector most exposed to unemployment represents 64 % of formal employment, which means an increase in informal employment, job instability and insecurity. This population does not have social security or savings to face the economic impact of a health emergency (OECD, 2020b).

In addition, social protection does not cover around 40 % of the population in rural areas where the situation is even more precarious. Before the end of 2020, the poverty in the region increased. CELAC estimated that the number of poor people in the region would grow from 186 to 214 million people, and the individuals in extreme poverty would rise from 67.5 to 83.4 million in 2020. Poverty and inequality restrict access to primordial goods and services, such as health services and food. In this regard, it is expected that a decrease in food consumption and quality will occur, mainly in countries with a high degree of inequality (FAO, 2020d).

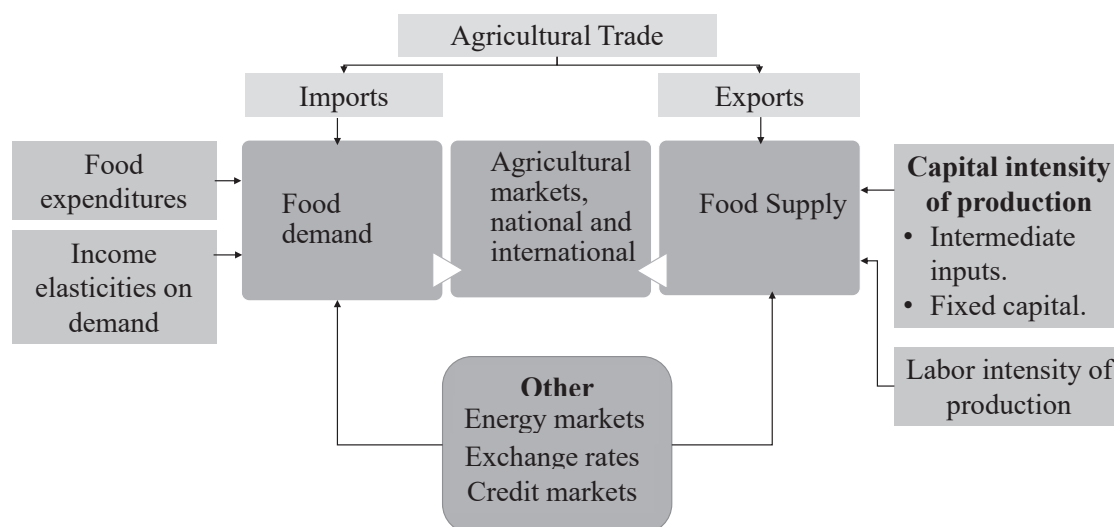


Figure 2. Main transmission channels of the impacts of the SARS-CoV-2 pandemic on food and agriculture.

For the food supply element, all indications for mobility restriction and social isolation have impacted all the way along the supply chain (ILO, 2020). A worldwide food price reduction was observed between February and March 2020, which resulted from a 4.3 % fall in the prices of major food groups (vegetable, cereals, oils, sugar, dairy and meat) motivated by reductions in demand as a consequence of SARS-CoV-2. Despite these price movements, the CELAC countries have shown no movements or general volatility in domestic food (FAO, 2020d). An analysis of the most critical effects of SARS-CoV-2 on the agri-food sector and the energy sector is included (Table 1).

Food shortages in Africa exacerbated by SARS-CoV-2

In Africa, the effect of SARS-CoV-2 is reflected in a considerable reduction in the production, distribution and storage of food (UN-WFP, 2020b). The measures that were taken to prevent contagion, such as social distancing and border closures, have led to a disruption in supply chains (FAO, 2020e). The food security is also affected by the climate change, growth population, low productivity, the economic turbulence and the social conflict, is currently worsened by the sanitary crisis and the arrival of pests (AAI and GCA, 2020).

Natural disasters and climate change in the region have reduced agricultural production, impacting the most vulnerable population, with probable long lasting and widespread consequences (FAO, 2020e). Rising temperatures and changed precipitation pattern affect the crop productivity and influence the agricultural pests and diseases. For example, cereal yields in Africa are in average about 1.5 tons per hectare, only half of those in South Asia. Africa is having natural disasters, such as:

Table 1. Analysis of SARS-CoV-2 effects, separated based on the trade balances of the agri-food sector and the energy sector (Schmidhuber *et al.*, 2020).

	Net food exporter	Net food importer
Net energy exporter	Bolivia, Colombia, Ecuador and Paraguay: Affected by lower export prices of both energy and agricultural products. An increase in the flow of food exports affects the supply and domestic prices of food, which provides incentives to establish export barriers to satisfy the domestic demand for food. Reductions in international prices and exports contribute to reduce the collection of tax revenues.	The Grenadines and Saint Vincent, Venezuela and Trinidad and Tobago: Benefit from lower agricultural import prices. However, lower international energy prices adversely affect them by reducing their energy export earnings, thereby undermining their ability to import enough food into international markets. Also, substantial depreciation in their currencies lead to increases in domestic prices of imported food.
Net energy importer	Argentina, Belice, Brasil, Chile, Costa Rica, Guatemala, Guyana, Honduras, México, Nicaragua, Perú and Uruguay: Affected by low international prices in the agricultural sector. Decrease in the inflow of foreign currency due to the drop in exports, putting pressure on the exchange rate, leading to an increase in the competitiveness of its agricultural products. Although the economy has become more dynamic, there is a risk of an internal shortage of products that are more frequently destined for export.	Antigua and Barbuda, Bahamas, Barbados, Cuba, Dominica, El Salvador, Granada, Haiti, Jamaica, Panama, the Dominican Republic, Saint Kitts and Nevis, Suriname and Saint Lucia: Benefit from lower international prices for energy and agricultural products. However, they are subject to possible affectations in the commercial flow due to interruptions in exports from surplus countries in these products or affectations in the transport chain of external or internal merchandise.

Schmidhuber *et al.* (2020).

infestation by locust swarms, which has wiped out entire crops in Sudan and floods in Yemen (IFPRI, 2020; IFPRI, 2021).

The social effects of the pandemic disturb directly or indirectly the food security, since the tourism is affected due to travel restrictions, which signified a loss of more than 14 million dollars. Remittances are essential for household consumption and monetary systems, such as those in: Zimbabwe, Lesotho, Mozambique, and Malawi, Egypt, Jordan and Sudan. However, the increased unemployment has reduced the currency inflows and household ability to purchase food (IFPRI, 2021). Many southern African countries are dependent on commodity exports to China; where the pandemic promoted recession and a prolonged reduction of the economy. This African area has weak sovereignty, high debt burdens, and volatile currencies (UN-WFP, 2020b).

A health crisis impacts agricultural production, with a repercussion in trade and marketing, rising food prices (AAI and GCA, 2020). In 2014, when Ebola spread in Guinea, Liberia and Sierra Leone, domestic rice prices increased by over 30 %, while cassava, a major staple in Liberia, shot up by 150 %. The rising food prices result in a dismissal of the rate of the Minimum Acceptable Diet (MAD) indicator, leading to increased malnutrition and hunger (UN-WFP, 2020b).

According to the Minimum Acceptable Diet (MAD) indicator, in Southern Africa, the MAD values fluctuated from 8 % in Zimbabwe to 23 % in Eswatini (formerly Swaziland), in contrast to the international target of 70 %. The expectation with the

SARS-CoV-2 crisis is a higher reduction of the indicator for the following years, if governments do not take actions, since food prices often mirror urban-rural divisions as well. The affordability of a nutritious diet is higher in urban areas, even if it is more expensive because incomes are higher. However, rural areas are strongly impacted by seasonality since food prices rise higher in the lean season as compared to urban areas (UNICEF, 2020).

In principle, high food prices may represent a smallholder farmer's opportunity for production increase. However, the incentives to produce more are affected by a lack of capital and increased input costs. For example, fertilizers have price risen much faster than finish good prices, as predicted by Rabobank (Diwakar, 2020).

Whether urban or rural, the poorest spend the largest income share on food and who have no asset access, such as land. Hence, SARS-CoV-2 could deepen food insecurity, malnutrition in Africa (WHO, 2020). Up to 73 million people in Africa live in acute food insecurity. Without urgent action, countries like: Burkina Faso, Nigeria, South Sudan and Yemen, will face famine in the following years (UN-WFP, 2020a).

Macro-level policies mitigate the socioeconomic impacts. A notable expansion of social protection programs has been implemented to support disadvantaged groups, but the high cost may lead to fiscal instability. SARS-CoV-2 is just one among multiple shocks that have hit the continent in recent years, and the risk of disease outbreaks and natural disasters are likely increasing. Building resilience will require food systems that promote inclusive investments (IFPRI, 2020; IFPRI, 2021).

Asia and the Pacific confronted the most significant effect

The SARS-CoV-2 pandemic has heightened food security risks in Asia and the Pacific. Due to major travel restriction, disruptions of domestic and international food supply chains have undermined food availability and accessibility (Kim *et al.*, 2020). At the beginning of 2019, the Republic of China followed a strict lockdown for two months, these lockdowns caused immediate and largescale impacts on entire stages of food supply chains, since China underpins the economies of many important countries on the continent, a slowdown in China results a disproportionate impact on trading partners (Swinnen and McDermott, 2020).

From the food supply, access to farm inputs became a challenge. Capital investments in the agriculture sector were postponed or even canceled due to weakening economic prospects. About 90 % of global goods trade is made via maritime, disrupted port facilities prevented the food import. Also, additional time and costs were imposed to handle cargo. In several developing economies in the region, the prices of rice and wheat had risen, partially due to adverse weather conditions in major Southeast Asia producer countries, but more broadly driven due to the pandemic disruptions to production and distribution, combined with panic buying (IFPRI, 2020; IFPRI, 2021). For the food demand, the impact of the pandemic has varied. Prices of certain staple foods drove up due to panic buying and hoarding. Short value chain, such as for staple crops, may benefit from steady demand. In contrast, the medium value

chains, such as perishable crops, could face lower demand due to income losses of the consumers and food service industry closure. Agriculture supply chain disruptions had disproportionately affected vulnerable households that had lost their jobs.

The nutrition status of the most exposed and vulnerable to the SARS-CoV-2 crisis is a particular concern (IFPRI, 2020; IFPRI, 2021). As the incomes and livelihoods of the poor and vulnerable were threatened, their access to safe, diverse and healthy food was challenged since most micronutrient-rich foods are highly perishable and highly vulnerable to disruptions in food supply chains, therefore, to price hikes (Swinnen and McDermott, 2020).

The greatest impact on the global workforce was suffered in Asia and the Pacific at the first quarter, 115 million jobs or a 6.5 % decline, and a second quarter decline of 10 %. The informal sector in the region is at particular risk given their social protection limited access and low wages, requiring to perform multiple jobs to sustain incomes. Informal employment shows the highest share in South Asia (89 %), followed by Southeast Asia (76 %) and Central Asia (70 %). The countries with the highest risk of impoverishment because of the crisis are Bangladesh, India and Nepal, since 9 out of 10 workers are informal (Kim *et al.*, 2020).

Job losses are at higher risk if agriculture supply chains remain disrupted, since this sector is the largest in the region, accounting for 266 million workers, 37 % of total employment. The World Bank has projected a 20 % decline in migrant worker remittance inflows to low- and middle-income countries in 2020 due to the SARS-CoV-2 pandemic, with a more severe decline expected in Central Asia and South Asia. Since half of the remittances are spent on agriculture-related expenses in rural communities, domestic food production is already hurt as a result (Ponsot *et al.*, 2017).

Support for food security short-term

The Asian Development Bank (ADB) has acted to support consumers of its developing member countries, increasing coverage, relaxing trade conditions and enhancing the benefits of social protection programs. Many governments have provided financial relief and liquidity support to farmers, agrobusinesses and food processors, by extending and relaxing credit conditions. ADB has a role to play supporting and strengthening a regional food reserve or establishing a special food security fund (Kim *et al.*, 2020).

Support for food security medium and long-term

The movement towards agricultural technology is a long-term response to food insecurity, accounting for the impact of climate change, environmental degradation and shrinking natural resources, such as water and arable land. A change towards mechanization and digital agriculture may as well accelerate and make the sector more competitive.

Policy reforms should promote market transparency, fair labor, digitized land use planning and food quality control. Direct marketing through online platforms helps to facilitate trading, avoid food waste and mitigate the profit loss of the farmers by reducing multiple layers of intermediaries. An enhanced price risk management

system, with information records of crop land use for production combined with weather predictions, market arrival, traded stocks and delivery schedules, can facilitate collaborative planning among agricultural value chain actors (Kim *et al.*, 2020). For example, some Indian farmer groups exchanged information using online platforms, arranged their own transportation of goods and directly sold their produce at markets not affected by lockdown (Mishra, 2020).

New food security policy in the European Union

Italy was the first European country hit by SARS-CoV-2. Soon after, many other European countries were impacted by the pandemic.

Throughout Europe, although scarcity of food was not a real threat, a concern about food systems' resilience has grown in face of the current SARS-CoV-2 crisis (Vittuari *et al.*, 2021), the crisis increased consciousness on Food Sovereignty, especially in the potential exposure of food systems to new crises, in terms of food access, consumer conduct, small-scale productions, and alternative food networks (Vittuari *et al.*, 2021). The lockdown put the region under strain and increases the threat of longer-term food insecurity. The region identifies two threats to food security: food shortage, triggering price rises, and an inequitable distribution of the available food. After march 2019, 80 % of European countries reported an increase of people seeking food assistance. More than 25 % of the food production depends on seasonal workers from abroad. Border closures and halt in the movement of people slowed food production (Toffolutti *et al.*, 2020).

A mark on the European Union (EU) has been left by the SARS-CoV-2 global crisis, since the new food policy Farm to Fork strategy (F2F) was presented in May 2020, and it has demonstrated a renewed interest to guarantee during any nature pandemic the food security and sustainability, putting them at the central structure of the whole F2F. The Commission has recognized that the current SARS-CoV-2 pandemic can place both food security and livelihoods at risk. To mitigate food system risks and better safeguard Europe from similar disturbances in the future, it is essential to reflect on the overall resilience of the European tactical value chains. This F2F strategy presents a new approach to just how the EU can guarantee food security in the upcoming whereas sustainably producing and treating food. The F2F was built to give farmers the support they need to guarantee food security all across the EU (Fortuna, 2020).

The EU executives also put forward another proposal to increase the long-term sustainability of food systems: An EU Food Security Observatory, to oversee and report on the capacity of the EU to guarantee the accessibility of food supplies, as well as food affordability (European Commission, 2020).

Furthermore, prompted by the supply chain disruptions determined by the coronavirus pandemic, the European Commission has recently unveiled the Action Plan on Critical Raw Materials to lead the green and digital transition envisioned under the European Green Deal. This Action Plan on Critical Raw Materials is aimed to: Develop strong supply chains in the face of difficulties in supplying the various industrial environments

of the EU. Reduce raw material dependency through innovation and the creation of sustainable products. Increase the supply of raw materials in the EU. Improve food diversity for the supply of third-world countries by avoiding international trade preferences towards other places of less need.

The principal observations EU have obtained with those strategies implemented since the beginning of the pandemic and so far in 2022 are: the related lockdown measures favored more formal and consolidated national and global supply chains; localized and sustainable food production and distribution practices had to face challenges, such as interruptions in the supply or demand chains due to the lockdown and the need to identify new distributions channels; then a policy that consider local needs and conditions and recognizes the benefits related with localized and sustainable food production and distribution practices becomes urgent, as the principal objective of Food Sovereignty (Vittuari *et al.*, 2021).

Global analysis

Most developed (D) and moderately developed (MD/ND) countries are mainly located in the regions that comprise Asia, North America and Europe. In contrast, the countries with less economic development are found in the regions that comprise Latin America and Africa (Table 2).

Due to the pandemic, similar measures had to be taken in all regions to combat the spread of the disease, such as social distancing, movement restrictions, total or partial closure of non-essential commercial activities, and in some places even essential activities (Table 3). Education and many work activities had to be carried out from home. The analysis of the impacts by region showed that the socioeconomic effects have not been the same.

The main pandemic social impacts are: firstly, the significant number of infections and deaths, mostly in the regions of America (north, center and south), Europe and Asia; in contrast to fewer infections and deaths in Africa and Oceania. These situations have been related to mobility and social contact, which are higher in regions of high economic development and globalization. Other critical social impacts are the border restrictions, the closure of schools, unemployment, racism, increase in hunger, malnutrition rise and the level of vaccination against the coronavirus; It can be seen that unemployment, hunger, malnutrition and the low level of vaccination occur mainly in those regions with less development, which demonstrates a global disparity and little social interest for those regions with greater poverty (Table 3).

Although the economic crisis derived from the pandemic has occurred in all regions, the recovery has been slower in the regions of Latin America, the Caribbean and Africa than in the regions of North America, Asia, the Pacific and Europe, where the economic recovery, at this date, is favorable, although it has not reach pre-pandemic rates (Table 3).

Food security and sovereignty have presented greater fragility in Latin America, the Caribbean, and especially in Africa. The imports, exports, income and economic

Table 2. Main countries by region and their economic development level.

Region	Countries
North America	Canada (D), United States (D), Mexico (MD), Central American countries (MD/ND)
Latin America and Caribbean	Region encompasses 33 countries most of them are MD/ND: * The Southern Common Market consisting of five countries in southern Latin America: Argentina (D/MD), Brazil (D/MD), Paraguay, Uruguay (D/MD) and Venezuela. * The Caribbean Community consisting of 19 island groups: Antigua and Barbuda, the Bahamas, Barbados, Belize, Dominica, Grenada, Guyana, Haiti, Jamaica, Montserrat, St. Kitts and Nevis, Saint Lucia, St. Vincent and the Grenadines, Suriname, and Trinidad and Tobago. * The Andean Community consisting of four countries: Bolivia, Colombia, Ecuador and Peru.
Africa	Of the 54 African countries, most of them are MD/ND: * North Africa: Algeria (D), Egypt (D), Libya (D), Morocco (MD), Sudan, Tunisia (D), Western Sahara (MD). * West Africa: Benin (ND), Burkia Faso (ND), Cape Verde (MD), Côte d'Ivoire (ND), Gambia (ND), Guinea (ND), Guinea-Bissau (ND), Liberia (ND), Mali (ND), Mauritania (ND), Niger (ND), Nigeria (ND), Saint Helena (MD), Senegal (ND), Sierra Leone (ND), Togo (ND). * Middle Africa: Angola (ND), Cameroon (MD), Central African Republic (ND), Chad (ND), Congo dem. Rep. (ND), Congo Rep. (ND), Equatorial guinea (ND), Gabon (D), São Tomé & Príncipe (ND). * East Africa: Burundi (ND), Comoros (ND), Djibouti (ND), Eritrea (ND), Ethiopia (ND), Kenya, Madagascar (ND), Malawi (ND), Mauritius (D), Mozambique (ND), Reunion (France), Rwanda (ND), Seychelles (D), Somalia and Somaliland (ND), South Sudan (ND), Tanzania (ND), Uganda (ND), Zambia (ND), Zimbabwe (MD). * Southern Africa: Botswana (D), Lesotho (MD), Namibia (MD), South Africa (D), Swaziland (D).
Asia and Pacific	Afghanistan (ND); American Samoa; Armenia; Australia (D); Azerbaijan; Bangladesh (ND); Bhutan (ND); Brunei (D), Darussalam; Cambodia(ND); Cook Islands; Democratic People's Republic of Korea (MD/ND); Fiji; French Polynesia; Georgia; Guam; Hong Kong (D), China (D); India (MD/ND); Indonesia (MD/ND); Iran (Islamic Republic of); Japan (D); Kazakhstan; Kiribati (ND); Kyrgyzstan; Lao People's Democratic Republic; Macao (ND), Malaysia; Maldives; Marshall Islands; Micronesia (Federated States of); Mongolia; Myanmar (ND); Nauru; Nepal (ND); New Caledonia; New Zealand (D); Niue; Northern Mariana Islands; Pakistan; Palau; Papua New Guinea; Philippines (MD/ND); Republic of Korea (D); Russian Federation (D); Samoa; Singapore; Solomon Islands (ND); Sri Lanka; Tajikistan; Thailand (ND); Timor-Leste (ND); Tonga; Turkey; Turkmenistan; Tuvalu (ND); Uzbekistan; Vanuatu (ND); Viet Nam (ND)
Europe	There are 44 countries in Europe, most of them are D and MD countries.

Developed (D), Medium Developed or No Developed (MD/ND).

support have been affected by the socioeconomic impacts of the pandemic. These impacts have exacerbated hunger, malnutrition and social inequality; additionally, their food production has also been affected since their production largely depends on supplies that, due to business closures or high costs, have not been possible to acquire (Table 3), putting food sovereignty at risk, which allows survival in the local environment.

Finally, the most developed regions seem to be moderately or even highly prepared to face the socioeconomic impacts of this pandemic, since they have provided an immediate response to the needs of their population in terms of vaccination, once the approval was released, economic and food assistance programs, market diversification

Table 3. Socio-economic pandemic impacts on food security and sovereignty worldwide.

Regio / average Vaccination %	Pandemic impacts		
	Social	Economic	Food Security and Sovereignty
North America: * 62 %	* Hunger has increased throughout the pandemic: 30 million adults and 12 million children impacted. * Black and Latins suffer more food insecurity. * Increased food demand due to consumer panic buying. * The demand shifted away from foodservice to food retail	* U.S. was forced into an economy crisis due to unemployment, and falling behind on housing payments. * Canada, Mexico and the rest of the North follow this trend.	* Agricultural markets remain regularly supplied and food was affordable. * U.S. struggled with food insecurity. * Food insecurity increased in prevalence from 54% to 64%. * Two Canadian studies reported prevalence of pandemic food insecurity of 14.8 %.
Latin America and Caribbean: * 60 %	* Rise in hunger and food insecurity levels were exacerbated. * Most pronounced rise in relation to other world regions, the prevalence of moderate to severe food insecurity grew by 9 %. * Education has been interrupted across the region.	* The International Monetary Fund (IMF) reported a 7.0 % economic contraction for Latin America and the Caribbean in 2020. * Caribbean nations that depend on tourism had deep economic recessions, several with estimated economic declines over 15 % in 2020. * Several South American nations were hard-hit with economic contractions over 10 %. * Economic contraction in 2020 increased poverty and exacerbated income inequality. Latin America and the Caribbean report estimated 22 million people in Latin America moved into poverty in 2020, 3 % more than 2019.	* During 2020, in Latin America and the Caribbean, 60 million people more than in 2019 did not have physical or economic access to food in the quantity and quality required for their health and development. * In South America between 2014 and 2020, the prevalence of moderate or severe food insecurity increased by 20.5 %, while in Mesoamerica there was an increase of 7.3 % during the same period. * According to the FAO, Food Price Index also experienced a downward trend, with sugar and vegetable oil prices showing the strongest declines -14.3 % and 5.2 % respectively. * A decline in export volume by the slowdown in consumption and economic activity of the principal trading partners. * The agricultural export sector faced complications in its operations due to soaring prices and logistical restrictions.
Africa: * 12 %	* Social distancing and border closures. * Fewer flights to the region. * Tourism is affected due to travel restrictions. * Increase in malnutrition and hunger especially in all ND countries. * Increased food demand due to consumer panic buying.	* The rising debt levels have led to increased vulnerabilities. * Limited savings and access to public safety nets. * Increased unemployment * Increased in poverty. * Gross domestic product (GDP) slowdown. * Exports slowdown to China in South Africa.	* A lack of pesticides is also hampering efforts to contain pest outbreaks, including the current locust outbreak in East Africa. * Rise in fertilizer prices. * Reduction in the production, distribution and storage of food * Fishing activities have been reduced in different part of Africa. * Rise in food prices.

Continue Table 3

Table 3. Socio-economic impacts of SARS-CoV-2 pandemic on food security and sovereignty worldwide.

Regio / average Vaccination %	Pandemic impacts		
	Social	Economic	Food Security and Sovereignty
Asia and Pacific: * 65 %	* Limited mobility, lockdowns and regulated travels. * Lost jobs and reduced work hours. * Closed Schools. * School meal programs were suspended affecting low-income children's access to healthy and balanced diets. * China slowdown resulted in a disproportionate impact in Asian and Pacific partners.	* Capital investments in the agriculture sector are postponed or even canceled due to weakening economic prospects. * Additional time and costs in cargo handling.	* Border closures and lockdowns limiting the movement of goods and people. * Access to farm inputs—such as seeds, fertilizers, and crop protection products—became challenging. * Processing and packaging facilities closed due to quarantines. * Disruptions to production and distribution. * Affections in household food consumption due to low household income and reduced mobility to groceries, restaurants, and other retail food shops.
Europe: * 64 %	* Death and illness of workers. * Lockdowns. * Border closures and halt in the movement of people. * Shortages and movement restrictions.	* The value of the output of the agricultural industry declined by 1.4% in 2020 compared to 2019. * Farm incomes also declined compared to 2019 (-7.9% corresponding to 7.1 billion EUR). * Conversely, retail sales increased with online food sales.	* Food shortages. * Triggering price rises. * Inequitable distribution of the available food. * Low production.

among other strategies (Table 4). On the other hand, few efforts have been made in the less developed regions to maintain their socio-economic security (Table 4). These regions have shown the lowest vaccination level and an increase in hunger and malnutrition. These situations had not been seen since the last crisis, which has led to a step back for those efforts to combat these long-lasting regional problems.

CONCLUSIONS

The current pandemic caused by SARS-CoV-2 has impacted various productive sectors around the world, including food production and supply. Malnutrition and food insecurity are about access and disruption of the food system, as a consequence of the fluctuations of the assets value and currency, as well as inflation, and all the opportunities of exchange in social, commercial, political and cultural aspects.

The widespread concern on nutrition being affected by food price increases is because of the large share of food expenditure household in developing countries. Food prices have an impact on the distribution of income in the population.

Enhanced regional mechanisms are required to appropriately distribute the food reserves in the international market and prepare for the positive crop forecasts, and to

Table 4. Government action to pandemic impacts on food security and sovereignty.

Region	Main government actions	References
North America	* Guaranty struggling families could get the nutritious food.	* USDA, 2020. * USDA, 2021. * https://covidvax.live/
Latin America and Caribbean	* An important factor for the region's economic recovery is the availability and distribution of vaccines. * Many countries have implemented relief programs to help protect their economies and vulnerable populations, using increased external financing, such as: the IMF, Inter-American Development Bank, and World Bank.	* FAO <i>et al.</i> , 2021. CEPAL, 2020. * Sullivan & Meyer, 2021. * Van Teijlingen & Hogenboom, 2020. * Schmidhuber <i>et al.</i> , 2020 * https://covidvax.live/ * FAO, 2020e. * Schmidhuber <i>et al.</i> , 2020.
Africa	* Social protection programs have been implemented, but not enough.	* UN-WFP, 2020b. * IFPRI, 2020. * IFPRI, 2021. * AAI and GCA, 2020.
Asia and Pacific	Immediate and short-term support: * Increasing coverage, relaxing conditionalities, and enhancing the benefits of social protection programs. * Immediate support to enhance smallholder farmers' access to markets. * Provide financial relief and liquidity support to farmers, agribusinesses, and food processors under financial stress. * Countries collaboration to avert food shortages and price spikes by ensuring free trade and strengthening regional mechanisms for food security. Medium- and long-term support for the agriculture supply chain: * Direct marketing through online platforms. * Enhanced price risk management system. * Movement toward agricultural technology. * Institutional and legislative reforms. * Targeted support to poor and smallholder farmers through agricultural reforms.	* Kim <i>et al.</i> , 2020. * Swinnen and McDermott, 2020. * IFPRI, 2020. * IFPRI, 2021.
Europe	* The EU response has been highly effective in preserving the integrity of the local markets. * The Commission of European Union (EU) introduced 'the green lanes' for vehicles carrying agri-food products to ensure free and fast movement on borders. * Free movement of agri-food and seasonal workers for enabling them to reach their workplace and exercise their activities. * The commission extended the farmers' application deadline to receive income support to support farmers and agri-food business to ensure liquidity. * Farm to Fork strategy (F2F) of 2020 demonstrated a renewed interest to guarantee the food security and sustainability.	* Vittuari <i>et al.</i> , 2021. * Toffolutti <i>et al.</i> , 2020. * European Commission, 2020. * Montanari <i>et al.</i> , 2021.

The references used for each region in this table also correspond to each region in Table 1 and Table 2.

prevent food shortages and price spikes by ensuring free trade for food security. South-South and Triangular Cooperation are organizations to strength agriculture systems, in order to open market access improving technology and agricultural finance to key actors in food supply chains, such as family farmers and smallholders. Lessons learned by this health crisis are used to develop long-sought agricultural reforms into the economies. The ultimate economic impact depends on the actions taken at the national, regional and global levels. Food security and nutrition require rapid response and longer-term planning. This pandemic is developing a food crisis, especially in vulnerable world areas.

ACKNOWLEDGMENTS

To the National Council of Science and Technology (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT) from Mexico, for the SNI support to Mendoza-Sánchez M. (CVU 228845). Also, to the Universidad Autónoma de Querétaro.

REFERENCES

- AAI (Africa Adaptation Initiative), GCA (Global Center on Adaptation). 2020. Integrated responses to building climate and pandemic resilience in Africa. <https://www.africaadaptationinitiative.org/assets/AAI-GCA%20Policy%20Brief.pdf> (Retrieved: November 2020).
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2020). Report on the economic impact of coronavirus disease (COVID-19) on Latin America and the Caribbean. <http://hdl.handle.net/11362/45603> (Retrieved: November 2020).
- Diwakar V. 2020. ODI: From pandemics to poverty: the implications of coronavirus for the furthest behind. <https://www.odi.org/blogs/16754-pandemics-poverty-implications-coronavirus-furthest-behind> (Retrieved: October 2020).
- European Commission. 2020. Brussels: Commission announces actions to make Europe's raw materials supply more secure and sustainable. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1542 (Retrieved: December 2020).
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020a. COVID-19 and rural poverty: Supporting and protecting the rural poor in times of pandemic. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8824en>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020b. COVID-19 and the risk to food supply chains: How to respond? Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8388en>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020c. The effect of COVID-19 on fisheries and aquaculture in Asia. Bangkok. <https://doi.org/10.4060/ca9545en>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020d. Seguridad Alimentaria Bajo la Pandemia COVID-19. <https://doi.org/10.4060/ca8873es>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020e. Policy Brief: The Impact of COVID-19 on Food Security and Nutrition. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/sg_policy_brief_on_covid_impact_on_food_security.pdf (Retrieved: November 2020).
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2021. Agricultural trade & policy responses during the first wave of the COVID-19 pandemic in 2020. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4553en>
- FAO (Food and Agriculture Organization), IFAD (International Fund for Agricultural Development), PAHO (Pan American Health Organization), WFP (World Food Programme), UNICEF (United Nations Children's Fund). 2021. Latin America and the Caribbean – Regional Overview of Food Security and Nutrition 2021: Statistics and trends. Santiago, FAO. https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55213/foodsecurityreport2021_eng.pdf?sequence=5&isAllowed=y (Retrieved: November 2020).
- Fortuna G. 2020. Euroactive: Food security again under EU spotlight in the wake of COVID-19 crisis. <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/news/food-security-again-under-eu-spotlight-in-the-wake-of-covid-19-crisis/> (Retrieved: November 2020).
- Gordillo G, Jeronimo OM. 2017. Food Security and Sovereignty. FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/a-ax736e.pdf> (Retrieved: November 2020).

- Headey D, Heidkamp R, Osendarp S, Ruel M, Scott N, Black R, Shekar M, Bouis H, Flory A, Haddad L, Walker N. 2020. Impacts of COVID-19 on childhood malnutrition and nutrition-related mortality. *The Lancet*, 396(10250), 519-521. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31647-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31647-0)
- IFAD (International Fund for Agricultural Development), UNICEF (United Nations Children's Fund), WFP (World Food Programme), WHO (World Health Organization). 2019. The state of food security and nutrition in the World: Safeguarding against economic slowdowns and downturns. FAO. Rome. <https://doi.org/10.4060/CA5162EN>
- IFAD (International Fund for Agricultural Development), UNICEF (United Nations International Children's Emergency Fund), WFP (World Food Programme), WHO (World Health Organization). 2020. The state of food security and nutrition in the World 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets. FAO. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>
- IFPRI (International Food Policy Research Institute). 2020. COVID-19-related trade restrictions on rice and wheat could drive up prices and increase hunger. <https://www.ifpri.org/blog/covid-19-related-trade-restrictions-rice-and-wheat-could-drive-prices-and-increase-hunger> (Retrieved: June 2020).
- IFPRI (International Food Policy Research Institute). 2021. 2021 Global Food Policy Report: Transforming Food Systems after COVID-19. Washington, DC: International Food Policy Research Institute. <https://doi.org/10.2499/9780896293991>
- ILO (International Labour Organization). 2020. COVID-19 and the impact on agriculture and food security [Online]. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/briefingnote/wcms_742023.pdf. Accessed on Apr. 24, 2020 (Retrieved: April 2020).
- Kim K, Kim S, Park CY. 2020. Food Security in Asia and the Pacific amid the COVID-19 Pandemic. <http://dx.doi.org/10.22617/BRF200176-2>
- Mishra M. 2020. Collaborating in a Time of Crisis: Three Early Takeaways from the COVID-19 Response in India. IFAD Blog. 21 April. <https://www.ifad.org/en/web/latest/blog/asset/41885044>. (Retrieved: December 2020).
- Montanari F, Ferreira I, Lofstrom F, Varallo C, Volpe S, Smith E, Kirova M, Wion A, Kubota U, Albuquerque JD. 2021. Research for Agri Committee – Preliminary impacts of the COVID-19 pandemic on European agriculture: a sector-based analysis of food systems and market resilience, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6a5ed385-143e-11ec-b4fe-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-241966924> (Retrieved: November 2020).
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 2020a. COVID-19 and international trade: Issues and actions. https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=128_128542-3ijg8kfswh&title=COVID-19-and-international-trade-issues-and-actions (Retrieved: December 2020).
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 2020b. COVID-19 in Latin America and the Caribbean: An overview of government responses to the crisis. https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=129_129907-eae84sciov&title=COVID-19-in-Latin-America-and-the-Caribbean_An-overview-of-government-responses-to-the-crisis (Retrieved: November 2020).
- Ponsot F, Vásquez B, Terry D, de Vasconcelos P. 2017. Sending Money Home: Contributing to the SDGs, one family at a time. Report to the International Fund for Agricultural Development (June). Rome, Italy: United Nations. <https://www.ifad.org/en/web/knowledge/publication/asset/39407416> (Retrieved: October 2020).
- Poudel PB, Poudel MR, Gautam A, Phuyal S, Tiwari CK, Bashyal N, Bashyal S. 2020. COVID-19 and its Global Impact on Food and Agriculture. <https://doi.org/10.35248/2322-3308.20.09.221>
- Schmidhuber J, Pound J, Qiao B. 2020. COVID-19: Channels of Transmission to Food and Agriculture. <https://doi.org/10.4060/ca8430en>
- Sohrabi C, Alsafi Z, O'Neill N, Khan M, Kerwan A, Al-Jabir A, Iosifidis C, Agha R. 2020. World Health Organization declares global emergency: A review of the 2019 novel coronavirus (COVID-19). *International Journal of Surgery*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2020.02.034>
- Sullivan MP, Meyer PJ. 2021. Latin America and the Caribbean: impact of COVID-19. Congressional Research Service. <https://sgp.fas.org/crs/row/IF11581.pdf> (Retrieved: February 2022).

- Sumner A, Hoy C, Ortiz-Juárez E. 2020. Estimates of the Impact of COVID-19 on Global Poverty. UNU-WIDER, April, 800-9. <https://doi.org/10.35188/UNU-WIDER/2020/800-9>
- Swinnen J, McDermott J. 2020. COVID-19 and global food security. Intl Food Policy Res Inst. <https://doi.org/10.2499/p15738coll2.133762>
- Toffolutti V, Stuckler D, McKee M. 2020. Is the COVID-19 pandemic turning into a European food crisis? European journal of public health, 30(4), 626-627. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckaa101>
- UNICEF (United Nations International Children's Emergency Fund). 2020. The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. In Rome FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>
- UN-WFP (United Nations - World Food Programme). 2020a. Global Report on Food Crisis. Joint Analysis for better decisions. https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000114546/download/?_ga=2.222701659.1942350357.1603395668-2088109267.1587703592 (Retrieved: November 2020).
- UN-WFP (United Nations - World Food Programme). 2020b. COVID 19, Economic and Health Impacts on Regional Food and Nutrition Security. <https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000115667/download/> (Retrieved: November 2020).
- USDA (United States Department of Agriculture). 2020. Will COVID-19 Threaten Availability and Affordability of our Food? <https://www.usda.gov/media/blog/2020/04/16/will-covid-19-threaten-availability-and-affordability-our-food> (Retrieved: October 2020).
- USDA (United States Department of Agriculture). 2021. Biden-Harris Administration's Actions to Reduce Food Insecurity Amid the COVID-19 Crisis. <https://www.usda.gov/media/press-releases/2021/03/03/biden-harris-administrations-actions-reduce-food-insecurity-amid> (Retrieved: April 2020).
- UNECLAC (United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean). 2020. Informe especial COVID-19 no. 1 - América Latina y el Caribe ante la pandemia del COVID-19: Efectos económicos y sociales. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45337-america-latina-caribe-la-pandemia-covid-19-efectos-economicos-sociales> (Retrieved: January 2021).
- Van Teijlingen KM, Hogenboom BB. 2020. COVID-19 impact on the value chain in Latin America. <https://www.jstor.org/stable/resrep25676> (Retrieved: February 2022).
- Vittuari M, Bazzocchi G, Blasioli S, Cirone F, Maggio A, Orsini F, Penca J, Petruzzelli M, Specht K, Amghar S, De Menna F. 2021. Envisioning the future of european food systems: approaches and research priorities after COVID-19. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 58. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.642787>
- Weersink A, von Massow M, Bannon N, Ifft J, Maples J, McEwan K, McKendree M, Nicholson C, Novakovic A, Rangarajan A, Richards T, Rude J, Schipanski M, Schnitkey G, Schulz L, Schuurman D, Schwartzkopf-Genswein K, Stephenson M, Thompson J, Wood K. 2021. COVID-19 and the agri-food system in the United States and Canada. *Agricultural Systems*, 188, 103039. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103039>
- Wolfson JA, Leung CW. 2020. Food Insecurity During COVID-19: An Acute Crisis with Long-Term Health Implications. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2020.305953>
- WHO (World Health Organization). 2020. WHO: COVID-19 could deepen food insecurity, malnutrition in Africa. Brazzaville. Take it from: <https://www.afro.who.int/news/covid-19-could-deepen-food-insecurity-malnutrition-africa> (Retrieved: November 2020).
- Wouters OJ, Shadlen KC, Salcher-Konrad M, Pollard AJ, Larson HJ, Teerawattananon Y, Jit M. 2021. Challenges in ensuring global access to COVID-19 vaccines: production, affordability, allocation, and deployment. *The Lancet* 397: 1023-1034. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00306-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00306-8)

SEGURIDAD Y SOBERANÍA ALIMENTARIA MUNDIAL AFECTADAS POR LA PANDEMIA DE SARS-CoV-2

Magdalena Mendoza-Sánchez^{1*}, Alejandro Espíndola-Ánimas¹, María de Jesús Mendoza-Sánchez²

¹ Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería. Cerro de las Campanas s/n. Querétaro, Querétaro, Mexico. C. P. 76010.

² Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Roque. Carretera Celaya-Juventino Rosas km 8, Roque, Guanajuato, Mexico. C. P. 38110.

*Corresponding author: mendozasan.mag@gmail.com.

RESUMEN

La actual crisis sanitaria causada por el coronavirus de tipo 2 asociado al síndrome respiratorio agudo grave (SARS-CoV-2) está desafiando varios de los supuestos de un mundo globalizado. Esta enfermedad está teniendo consecuencias graves sobre la seguridad y soberanía alimentaria, en especial entre las poblaciones más pobres y vulnerables, dado que cualquier brote de enfermedad infecciosa está directamente relacionado con un aumento del hambre y la desnutrición. En esta revisión se analizan los impactos de la crisis sanitaria ocasionada por SARS-CoV-2 en la seguridad y soberanía alimentaria en el contexto internacional, y resaltar cómo están actuando los gobiernos para reducir las consecuencias, por medio del uso de un análisis exploratorio y una metodología analítica. Si bien los Estados Unidos pudo superar la crisis de salud, es la crisis alimentaria la que ha excedido las expectativas más pesimistas, como resultado del creciente desempleo. En América Latina, la pandemia está dificultando el acceso a los alimentos y la situación económica de sus habitantes. La crisis sanitaria ha agravado la escasez de alimentos que ya existía en África, en especial en las zonas rurales. Asia sufrió el mayor impacto en la seguridad alimentaria. La nueva política alimentaria en la Unión Europea tiene como objetivo mantener la seguridad en este rubro. La inseguridad alimentaria y la desnutrición no se relacionan sólo con la producción agrícola; sino también con las limitaciones en el acceso a los alimentos. En consecuencia, no se debe permitir que esta crisis sanitaria se convierta también en una crisis alimentaria.

Palabras clave: Pandemia, coronavirus, COVID-19, seguridad alimentaria, soberanía alimentaria, impactos socioeconómicos.

INTRODUCCIÓN

La pandemia causada por el coronavirus de tipo 2 asociado al síndrome respiratorio agudo grave (SARS-CoV-2) ha desatado una crisis mundial (Sohrabi *et al.*, 2020). Las consecuencias severas de esta crisis han impactado a la población mundial, en especial a los más pobres y vulnerables (Sumner *et al.*, 2020). La desaceleración económica inducida por la pandemia ha tenido un impacto significativo en el empleo, en particular en los países en desarrollo. Alrededor del 80 % de la población activa ha sido afectada

Citation: Mendoza-Sánchez M, Espíndola-Ánimas A, Mendoza-Sánchez MJ. 2022. Global food security and sovereignty impacted by SARS-CoV-2 pandemic. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2719>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: July 08, 2021.
Approved: February 27, 2022.
Estimated publication date:
March 07, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 316-358.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



total o parcialmente por el cierre de lugares de trabajo (Kim *et al.*, 2020). Debido a su impacto en los sectores de la alimentación y la agricultura, es fundamental salvar la continuidad de las cadenas de suministro de alimentos a nivel nacional e internacional.

El sistema alimentario mundial ahora está a prueba, ya que ha estado bajo presión en el pasado año y quizás los años siguientes (FAO, 2020a). La agricultura es importante en el desarrollo humano y está estrechamente relacionada con la seguridad alimentaria (Poudel *et al.*, 2020). Cualquier brote de enfermedad infecciosa está directamente relacionado con un aumento del hambre y la desnutrición (Headey *et al.*, 2020). Según la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el mundo enfrenta un difícil desafío en términos de logística de transporte, ya que los países no pueden llevar alimentos de un punto a otro debido a las restricciones de movilidad. En cuanto a los trabajadores de las granjas y la industria alimentaria, ellos podrían ausentarse de las tareas agrícolas y del procesamiento de alimentos, lo que estaría provocando escasez de mano de obra para la cosecha y dificultades para llevar los alimentos al mercado (FAO, 2020b). Como resultado, se ha reducido la producción de alimentos de alto valor, tales como: frutas, verduras y alimentos procesados (Swinnen y McDermott, 2020).

El cierre de restaurantes y la baja frecuencia de compra en las tiendas de abarrotes redujeron la demanda de productos frescos y pesqueros, afectando a productores y proveedores (OCDE, 2020a). Los sectores de agricultura, pesca y acuicultura se han visto afectados por las restricciones al turismo (FAO, 2020c), y la suspensión de las actividades escolares (FAO, 2020a). Aunque la vacuna ya está disponible en la mayoría de los países, el mundo está lejos de alcanzar el nivel de inmunidad necesario para estar completamente seguro. Por lo que el panorama no es alentador, tanto para los países en desarrollo como para los subdesarrollados (Wouters *et al.*, 2021). Por lo tanto, cada país debe generar estrategias que permitan la soberanía alimentaria, fortalecer la producción de alimentos y su sistema de distribución, dando mayor relevancia a la población más vulnerable.

La hipótesis es que la crisis sanitaria está afectando aspectos económicos y sociales en todo el mundo, dando como resultado una crisis alimentaria, especialmente en zonas vulnerables. Se requiere un análisis de la información para identificar los impactos de la crisis sanitaria en la seguridad y soberanía alimentaria en el contexto internacional. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo contextualizar cómo la seguridad y soberanía alimentaria se están viendo afectadas por la propagación de la enfermedad SARS-CoV-2 y qué están haciendo algunos gobiernos para reducir su impacto.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio utilizamos técnicas exploratorias y analíticas a través de tres pasos centrales: 1) Diseño de la estructura, 2) Búsqueda sistemática de literatura y análisis de información, y 3) Revisión de la redacción. Primero, los miembros del equipo nos reunimos para analizar y justificar la necesidad de la investigación y formular las principales interrogantes y objetivos a ser alcanzados; para finalmente concluir que esta

pandemia, como ha sucedido con otras crisis sanitarias, ha exacerbado el riesgo a la seguridad y soberanía alimentaria, especialmente en zonas vulnerables del mundo. La búsqueda de información se realizó en poco más de dos años (enero 2020 - febrero 2022) procesando lo obtenido en las siguientes bases de datos: ScienceDirect, Elsevier, Springer e International Organization Reports. Además, la información se restringió a un período de tiempo: los diez años anteriores. La búsqueda bibliográfica sistemática y el análisis de la información se realizaron con el siguiente ciclo de búsqueda (Figura 1).

El método utilizado involucró una investigación periódica y un seguimiento detallado de la información de origen utilizando una hoja de cálculo; la información se clasificó por región del mundo, estado de desarrollo; impactos socioeconómicos, impactos a la seguridad y la soberanía alimentarias; nivel de vacunación y acciones gubernamentales. La información fue organizada de esta manera para permitir el análisis por regiones y la comparación entre ellas, siguiendo este ciclo de búsqueda.

Seguridad y soberanía alimentarias en el mundo

Según la FAO, “Existe seguridad alimentaria cuando todas las personas, en cualquier momento, tienen acceso físico y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfagan sus necesidades dietéticas y preferencias alimentarias para una vida activa y saludable” (FAO, 2020d).

Este concepto es multidimensional, ya que incluye: la estabilidad en el tiempo de la disponibilidad de alimentos, su acceso económico y sus usos biológicos. Mientras que, el término “Soberanía Alimentaria” se define como: “el derecho de los pueblos

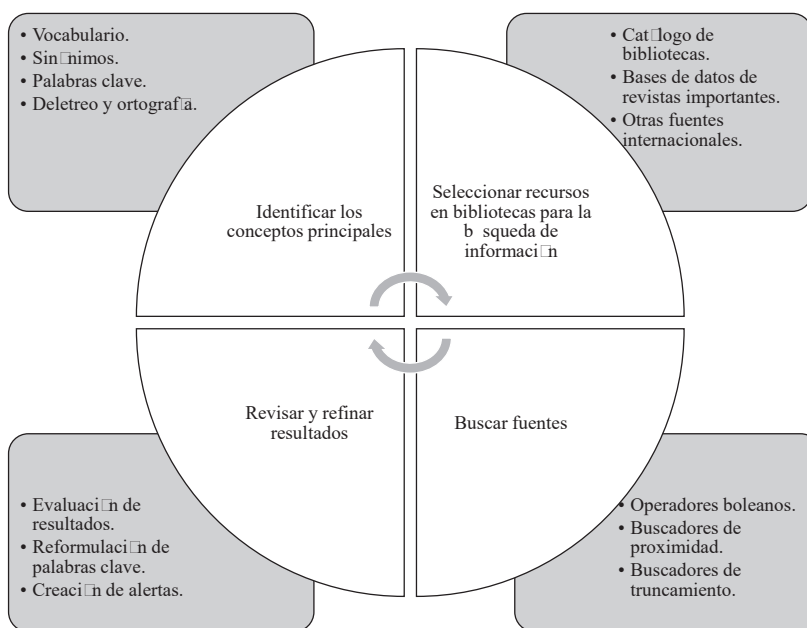


Figura 1. Ciclo de búsqueda (Universidad Charles Stuart, 2018).

a alimentos sanos y culturalmente apropiados, producidos mediante métodos ecológicamente racionales y sostenibles, y su derecho a definir sus sistemas alimentarios y agrícolas” (Gordillo y Jerónimo, 2017).

Este último concepto pone las aspiraciones y necesidades de quienes producen, distribuyen y consumen alimentos como prioritarias dentro de los sistemas y políticas alimentarias, en lugar de las demandas de los mercados y las corporaciones. Entonces, la diferencia fundamental entre “Seguridad Alimentaria” y “Soberanía Alimentaria” consiste en la definición de los mecanismos a través de los cuales se debe asegurar el abastecimiento alimentario. Mientras la seguridad alimentaria privilegia el productivismo y el comercio internacional para la disponibilidad de alimentos, la soberanía alimentaria propone prácticas agroecológicas; circuitos cortos de producción y distribución; así como el respeto a la diversidad cultural, genética y de ecosistemas. Por lo tanto, las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales en todo el mundo deberían tener como objetivos principales tanto la seguridad como la soberanía alimentaria, especialmente en los países más pobres y las áreas amenazadas por la guerra o el cambio climático.

Como muestran los datos, la pandemia de SARS-CoV-2 ha puesto en riesgo tanto la seguridad como la soberanía alimentaria en todo el mundo, especialmente en aquellas zonas en condiciones críticas. De allí que se debe asegurar la equidad alimentaria, a través de sistemas eficientes de producción y distribución desde las reservas y mercados internacionales (ONU-PMA, 2020a).

Las restricciones al comercio mundial han provocado escasez y elevado los precios de los alimentos; asimismo, las limitaciones de viaje, la interrupción de las operaciones de vuelos, el cierre de fronteras y la escasez de mano de obra han trastornado las cadenas de suministro de alimentos, que son esenciales para garantizar la estabilidad de dicho abastecimiento (FAO, 2021).

Debido al cierre de lugares de trabajo, escuelas y restaurantes, la demanda de algunos productos cotidianos, como los alimentos perecederos, se ha reducido, provocando escasez en algunas regiones y desperdicio de alimentos en otras. En consecuencia, hay una brecha que salvar entre el desperdicio de alimentos y el hambre.

La pandemia de COVID-19 generó un desempleo masivo. Dada la estrecha relación de la pobreza y la seguridad alimentaria, se debe dar prioridad a las medidas de protección social para proteger a los vulnerables, especialmente a la economía informal. Un informe de la Oficina de Estadísticas Laborales de Estados Unidos muestra que, en marzo de 2021, la economía estadounidense agregó 916,000 puestos de trabajo. Sin embargo, un gran número de trabajadores continúan solicitando una compensación por desempleo. La misma situación ocurre en otros países, por lo que la recuperación de la economía global es incierta, especialmente debido a los recientes brotes de virus en muchas regiones.

Antes de la actual pandemia, había 820 millones de personas sin acceso a alimentos; 2000 millones de personas sufrían desnutrición y 700 millones vivían por debajo del umbral de la pobreza (IFAD *et al.*, 2019).

Según proyecciones recientes, 100 millones de personas podrían necesitar asistencia humanitaria en los próximos años, y este número puede aumentar si no se toman acciones multilaterales (UN-WFP, 2020a).

América del Norte frente a la pandemia por SARS-CoV-2

Las cadenas agroalimentarias de América del Norte, especialmente en Estados Unidos y Canadá, se han caracterizado por ser altamente eficientes. Sin embargo, en el primer año de la pandemia hubo una sorprendente vulnerabilidad en estas cadenas alimentarias debido a la pérdida temporal, casi total, del canal de distribución de servicios de alimentos, debido a los brotes de SARS-CoV-2 en la fuerza laboral de este sector. Esto revela que se debe prestar atención especial a los efectos severos que una crisis inesperada puede tener en la seguridad alimentaria. Sin embargo, esta región del continente logró superar rápidamente los efectos de la pandemia, con precios y niveles de producción similares a los típicamente observados en años previos a la pandemia (Weersink *et al.*, 2021). Además, la demanda se desplazó del servicio de alimentos a la venta minorista de alimentos, sin embargo, los sistemas que han evolucionado para entregar alimentos al menor costo a estos usuarios finales no pudieron adaptarse lo suficientemente rápido a un impacto tan significativo.

Otros cambios estructurales se sentirán a través de los mercados de insumos, sobre todo la mano de obra, ya que la tendencia a una mayor automatización seguirá acelerándose como respuesta a la falta de trabajadores sanos y productivos. Además, las consecuencias económicas inducen cambios en la compra de alimentos por parte de los consumidores, que van desde las realizadas en línea hasta un aumento en las adquisiciones a proveedores locales (Weersink *et al.*, 2021).

Estados Unidos ya enfrenta el impacto de la COVID-19

A principios de marzo de 2020, cuando comenzaban a sentirse los efectos de la pandemia, el Gobierno de los Estados Unidos manifestó su confianza en la seguridad alimentaria, basada en tres fuentes principales de insumos: producción interna, importaciones y almacenamiento (USDA, 2020).

De acuerdo con un pronóstico del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), la producción nacional de productos básicos agrícolas sería suficiente, ya que la producción de carne roja para 2020 fue de unos 56,700 millones de libras, 3 % más que la de 2019, mientras que la producción de carne de ave fue de 51,600 millones de libras, 2 % más que en 2019.

La producción de huevos y leche también fue mayor en 2020 en comparación con 2019. Además, un informe del USDA sobre productos básicos en almacenamiento en frío mostró que, a fines de febrero, el total de carne roja en congeladores fue un 5 % más alto y el pollo fue un 6 % más que el año anterior.

En cuanto a los cereales, la producción de trigo en 2019/2020 fue un poco más del 2 % de la cosecha pasada. Los suministros de trigo, en particular de trigos harineros, fueron abundantes.

Con respecto a la importación de alimentos, el USDA informó que el pronóstico sugería que incluso los países muy afectados por la propagación de SARS-CoV-2 continuarían enviando productos alimenticios y que no habría riesgos inmediatos de interrupciones masivas en la cadena de suministro global.

Hubo importaciones de alimentos en cantidades mayores, como frutas, nueces y algunos cortes de carne (USDA, 2020). Sin embargo, la recesión económica causada por la pandemia de SARS-CoV-2 ya ha tenido consecuencias devastadoras, ya que la información actual muestra que Estados Unidos está teniendo una recesión que no se veía desde la Gran Recesión de 2007.

Decenas de millones de personas han perdido sus trabajos o han reducido sus horas de trabajo, aumentando la pobreza (Wolfson y Leung, 2020). Feeding America, la más grande organización nacional de mitigación del hambre, estudió el impacto de SARS-CoV-2 en la seguridad alimentaria y descubrió que 1 de cada 9 personas experimentará inseguridad alimentaria en los siguientes años.

En este estudio también se reportó que 21 % de las personas negras (1 de cada 5) podría experimentar inseguridad alimentaria durante 2021, en comparación con el 11 % de las personas blancas. En respuesta a este problema, la administración del actual presidente y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) han propuesto varias acciones que se llevarán a cabo para garantizar alimentos nutritivos. Debido a las restricciones, el acceso a los alimentos también es un elemento que se ha visto afectado. Se implementará otra estrategia para abordar este problema, y mejorar el acceso a las compras en línea, aumentando el acceso a los alimentos. Actualmente, el USDA amplía el programa Piloto de Compras en Línea SNAP más allá de los 8 estados originales. Más de 1.5 millones de hogares en 46 estados y Washington D.C. están usando los beneficios de SNAP para comprar. Adicionalmente, se contempla un mayor apoyo a territorios estadounidenses, como Samoa y Puerto Rico. Además, se mantuvieron y aumentaron los apoyos nutricionales que ya se daban en las escuelas a los estudiantes. También se está apoyando un programa de salud y nutrición para madres jóvenes y sus hijos, así como apoyo nutricional para estudiantes con dificultades, y poblaciones de jóvenes en situación de calle que antes no estaban contempladas (USDA, 2021).

Centroamérica y México

Centroamérica y México incluyen las regiones subtropicales y tropicales del continente norteamericano y comprenden México, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá.

La región tiene algunos de los sistemas agrícolas más grandes, productivos y tecnificados del mundo, también cuenta con operaciones de alimentación de ganado, sistemas intensivos de producción hortícola para consumo interno y exportación, y algunos sistemas agroalimentarios de subsistencia con recursos limitados y altamente marginados. Sin embargo, algunas regiones de estos países se encuentran entre las más pobres del mundo (López-Ridaura *et al.*, 2021).

Los acuerdos comerciales internacionales en la región y la producción agrícola no tradicional han propiciado la migración de jóvenes a las zonas urbanas y a Estados Unidos; al mismo tiempo, han creado una entrada masiva de remesas a las zonas rurales. Sin embargo, la incidencia de la pobreza rural no ha cambiado, especialmente entre las poblaciones indígenas, ni la distribución desigual de la tierra. Costa Rica se destaca por la distribución de la tierra más equitativa en comparación con Guatemala, el país con mayor desigualdad de tierras (López-Ridaaura *et al.*, 2021). Sin embargo, la pandemia de SARS-CoV-2 ha afectado al sector agroalimentario de la región, principalmente debido a las altas tasas de infección, la reducción de la movilidad, la disminución de la disponibilidad de mano de obra, la interrupción de los servicios financieros, la interrupción de las instalaciones de distribución de envases, la contracción de los mercados nacionales e internacionales, y retrasos en las importaciones y exportaciones. Los insumos del sistema agroalimentario, tales como: fertilizantes, semillas, medicamentos veterinarios y alimentos para animales, se volvieron escasos y costosos cuando estaban disponibles en la región. Los agricultores del sur de México informaron que la movilidad reducida dificultaba el acceso a las tiendas de insumos. En Guatemala, los productores de granos básicos y hortalizas vieron un aumento en los costos de los insumos agrícolas. En Honduras, los productores manifestaron que la retención de insumos en aduana había generado dificultades para mantener su producción, por mencionar solo algunos ejemplos (López-Ridaaura *et al.*, 2021). La COVID-19 altera las economías y los sistemas alimentarios en todas partes, pero los pobres sufren el riesgo más importante de crisis alimentaria. Como se puede observar en el continente norteamericano, el riesgo de aumento de la inseguridad alimentaria depende del desarrollo económico. A medida que disminuyen las oportunidades de empleo e ingresos para los pobres, crece la brecha entre ricos y pobres.

América Latina y el Caribe desde una posición más débil

Previo a la actual pandemia, en la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) se esperaba un crecimiento del 1.3 % del PIB en 2020. Sin embargo, la crisis sanitaria ha provocado una caída del PIB de al menos 1.8 %. Se pronostican otros efectos por la pandemia, como una reducción de más del 3 %.

La CEPAL (2020) planteó que la crisis sanitaria afecta a la región a través de cinco canales externos principales: Primero, la disminución de la actividad económica de sus principales socios comerciales, ya que la región depende de varias exportaciones, cuyo volumen y valor se verán reducidos por la recesión global. En segundo lugar, la caída de los precios de los productos primarios, debido a la contracción de la demanda global, particularmente de China, el mayor consumidor e importador de productos primarios, afectará principalmente a los países exportadores. En tercer lugar, la interrupción de las cadenas globales de valor, comenzando con los proveedores chinos y luego la producción europea y estadounidense, afectando principalmente a México y Brasil, cuyos sectores manufactureros son los más grandes de la región. Cuarto, menor demanda de servicios turísticos por restricciones de viaje. La actividad turística

en el Caribe se ha contraído más de un 25 %. Los países más afectados son los países insulares cuya economía depende del turismo, tales como: Antigua y Barbuda, Belice, Barbados, Dominica, Guyana, Granada, Haití, Jamaica, San Cristóbal y Nieves, Santa Lucía, San Vicente y Las Granadinas, Surinam, y Trinidad y Tobago (CEPAL, 2020). Quinto; es el aumento de la aversión al riesgo y el empeoramiento de las condiciones financieras mundiales. La menor demanda actual de los activos financieros de la región y la depreciación significativa de las monedas.

Estos efectos sociales y económicos de la pandemia en América Latina y el Caribe son una amenaza para lograr la seguridad alimentaria. Además, en los últimos años la seguridad alimentaria en la región se ha deteriorado, y ahora la crisis sanitaria empeora la situación (FAO, 2020d).

En América del Sur, la prevalencia del hambre en 2020 fue del 7.8 %. Entre 2014 y 2020, el hambre pasó de 3.8 % a 7.8 % en América del Sur, con un aumento del 4 % en seis años.

Es importante mencionar que la mitad de este incremento se dio durante el último año, en el contexto de la pandemia de SARS-CoV-2, lo cual significó que la desnutrición en América del Sur alcanzará su nivel más alto desde 2007 (IFAD *et al.*, 2019; FAO *et al.*, 2021).

El impacto de la pandemia sobre los sistemas y la seguridad alimentarios en los países de la CELAC ha variado, en dependencia de las políticas y estrategias de salud establecidas, las estructuras productivas y comerciales, el grado de inequidad de ingresos y factores externos relacionados con los mercados energéticos y crediticios, o el tipo de cambio (Figura 2), (FAO, 2020d).

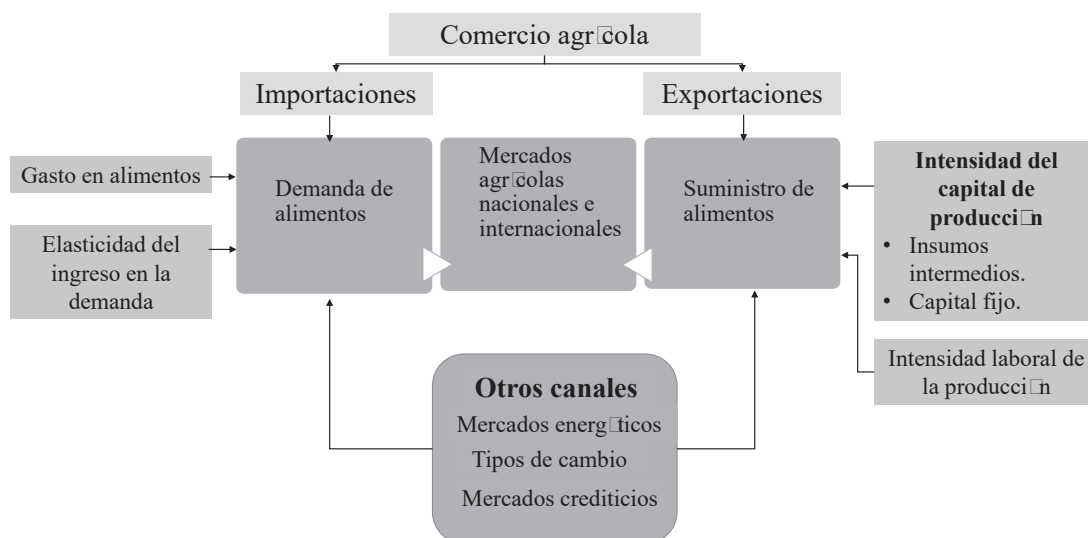


Figure 2. Principales canales de transmisión de los impactos de SARS-CoV-2-19 en la alimentación y la agricultura.

En la demanda de alimentos, la pandemia está impactando el acceso económico de las familias. El decrecimiento económico en la región ha llevado a un aumento de la tasa de desempleo de 8.1 % a 11.5 %, afectando a la población cuyos ingresos son necesarios para adquirir bienes básicos y servicios elementales (FAO, 2020d).

El sector más expuesto al desempleo representa el 64 % del empleo formal, lo que significa un aumento del empleo informal, inestabilidad laboral e inseguridad. Esta población no cuenta con seguridad social ni ahorros para enfrentar el impacto económico de una emergencia sanitaria (OCDE, 2020b).

Además, la protección social no cubre a un 40 % de la población en las zonas rurales donde la situación es aún más precaria. Antes de finalizar 2020, la pobreza en la región aumentó. La CELAC estimó que el número de pobres en la región crecería de 186 a 214 millones de personas, y las personas en pobreza extrema pasarían de 67.5 a 83.4 millones en 2020.

La pobreza y la desigualdad restringen el acceso a bienes y servicios primordiales, como los servicios de salud y alimentación. En este sentido, se espera que se produzca una disminución del consumo y la calidad de los alimentos, principalmente en países con un alto grado de desigualdad (FAO, 2020d).

También todas las indicaciones de restricción de movilidad y aislamiento social han tenido su impacto a lo largo de toda la cadena de suministro de alimentos (OIT, 2020). Se observó una reducción de los precios de los alimentos a nivel mundial entre febrero y marzo de 2020, que resultó de una caída del 4.3 % en los precios de los principales grupos de alimentos (verduras, cereales, aceites, azúcar, lácteos y carnes) motivado por reducciones en la demanda como consecuencia de SARS-CoV-2.

A pesar de estos movimientos de precios, los países de la CELAC no han mostrado movimientos ni volatilidad generalizada en los alimentos domésticos (FAO, 2020d). Se incluye un análisis de los efectos más severos de SARS-CoV-2 en el sector agroalimentario y el sector energético (Cuadro 1).

Escasez de alimentos en África exacerbada por SARS-CoV-2

En África, el efecto de SARS-CoV-2 se refleja en una reducción considerable de la producción, distribución y almacenamiento de alimentos (ONU-PMA, 2020b). Las medidas que se tomaron para prevenir el contagio, como el distanciamiento social y el cierre de fronteras, han provocado una disrupción en las cadenas de suministro de alimentos (FAO, 2020e).

La seguridad alimentaria también se ve afectada por el cambio climático, el crecimiento de la población, la baja productividad, las turbulencias económicas y el conflicto social, y actualmente se ve agravada por la crisis sanitaria y la llegada de plagas (AAI y GCA, 2020).

Los desastres naturales y el cambio climático en la región han reducido la producción agrícola, impactando a la población más vulnerable, con probables consecuencias duraderas y generalizadas (FAO, 2020e). El aumento de las temperaturas y el cambio en el patrón de precipitaciones afectan la productividad de los cultivos e influyen en las

Cuadro 1. Análisis de los efectos de SARS-CoV-2, separados en función de las balanzas comerciales del sector agroalimentario y del sector energético (Schmidhuber *et al.*, 2020).

	Exportador neto de alimentos	Importador neto de alimentos
Exportador neto de energía	Bolivia, Colombia, Ecuador y Paraguay: Afectados por precios más bajos de exportación tanto de productos energéticos como agrícolas. Un aumento en el flujo de exportaciones de alimentos afecta la oferta y los precios internos de los alimentos, lo que brinda incentivos para establecer barreras a la exportación y satisfacer la demanda interna de alimentos. Las reducciones en los precios internacionales y las exportaciones contribuyen a reducir la recaudación de impuestos.	Las Granadinas y San Vicente, Venezuela y Trinidad y Tobago: Se favorecen de precios de importación agrícolas más bajos. Sin embargo, los precios internacionales más bajos de la energía los afectan negativamente al reducir sus ingresos por exportación de energía, lo que socava su capacidad para importar suficientes alimentos de los mercados internacionales. Además, la depreciación sustancial de sus monedas conduce a aumentos en los precios internos de los alimentos importados.
Importador neto de energía	Argentina, Belice, Brasil, Chile, Costa Rica, Guatemala, Guyana, Honduras, México, Nicaragua, Perú y Uruguay: Afectados por precios internacionales bajos en el sector agropecuario. Disminución del ingreso de divisas por la caída de las exportaciones, ejerciendo presión sobre el tipo de cambio, lo que redundará en un aumento de la competitividad de sus productos agropecuarios. Si bien la economía se ha vuelto más dinámica, existe el riesgo de una escasez interna de productos que con mayor frecuencia se destinan a la exportación.	Antigua y Barbuda, Bahamas, Barbados, Cuba, Dominica, El Salvador, Granada, Haití, Jamaica, Panamá, República Dominicana, San Cristóbal y Nieves, Surinam y Santa Lucía: Se benefician de precios internacionales más bajos de la energía y productos agrícolas. Sin embargo, están sujetos a posibles afectaciones en el flujo comercial por interrupciones en las exportaciones de países excedentarios en estos productos o afectaciones en la cadena de transporte de mercancías externas o internas.

Schmidhuber *et al.* (2020).

plagas y enfermedades agrícolas. Por ejemplo, los rendimientos de cereales en África son en promedio alrededor de 1.5 toneladas por hectárea, solo la mitad de los del sur de Asia. África está experimentando desastres naturales, como: plagas de langostas, que han acabado con todos los cultivos en Sudán e inundaciones en Yemen (IFPRI, 2020; IFPRI, 2021).

Los efectos sociales de la pandemia perturban directa o indirectamente la seguridad alimentaria, ya que el turismo se ve afectado por las restricciones de viaje, lo que significó una pérdida de más de 14 millones de dólares.

Las remesas son esenciales para el consumo de los hogares y los sistemas monetarios, como los de: Zimbabue, Lesotho, Mozambique y Malawi, Egipto, Jordania y Sudán. Sin embargo, el aumento del desempleo ha reducido la entrada de divisas y la capacidad de los hogares para comprar alimentos (IFPRI, 2021).

Muchos países del sur de África dependen de las exportaciones de productos básicos a China; países donde la pandemia promovió la recesión y una reducción prolongada de la economía. Esta área africana tiene una soberanía débil, cargas de deuda elevadas y monedas volátiles (ONU-PMA, 2020b).

Una crisis sanitaria impacta la producción agrícola, con repercusión en el comercio y la comercialización, elevando los precios de los alimentos (AAI y GCA, 2020). En 2014,

cuando el ébola se extendió por Guinea, Liberia y Sierra Leona, los precios internos del arroz aumentaron más de un 30 %, mientras que la yuca, un alimento básico importante en Liberia, se disparó un 150 %.

El aumento de los precios de los alimentos da como resultado una desestimación de la tasa del indicador de la Dieta Mínima Aceptable (MAD), lo que lleva a un aumento de la desnutrición y el hambre (ONU-PMA, 2020b). Según el indicador de dieta mínima aceptable (MAD), en el sur de África, los valores de MAD fluctuaron del 8 % en Zimbabue al 23 % en Esuatini (antes Suazilandia), en contraste con el objetivo internacional del 70 %.

La expectativa con la crisis de SARS-CoV-2 es una mayor reducción del indicador para los próximos años si los gobiernos no toman medidas, ya que los precios de los alimentos a menudo también reflejan las divisiones urbano-rurales. El acceso a una dieta nutritiva es mayor en las zonas urbanas, incluso si es más costosa porque los ingresos son más altos. Sin embargo, las áreas rurales se ven fuertemente afectadas por la estacionalidad, ya que los precios de los alimentos aumentan más en la temporada de escasez en comparación con las áreas urbanas (UNICEF, 2020).

En principio, los altos precios de los alimentos pueden representar una oportunidad para que un pequeño agricultor aumente su producción. Sin embargo, los incentivos para producir más se ven afectados por la falta de capital y el aumento de los costos de los insumos. Por ejemplo, los precios de los fertilizantes han subido mucho más rápido que los precios del producto final, como predijo Rabobank (Diwakar, 2020).

Ya sea en zonas urbanas o rurales, los más pobres gastan la mayor parte del ingreso en alimentos y no tienen acceso a activos, como la tierra. Por lo tanto, SARS-CoV-2 podría profundizar la inseguridad alimentaria y la desnutrición en África (OMS, 2020). Hasta 73 millones de personas en África viven en situación de inseguridad alimentaria aguda. Sin una acción urgente, países como: Burkina Faso, Nigeria, Sudán del Sur y Yemen enfrentarán hambruna en los próximos años (ONU-PMA, 2020a).

Las políticas a nivel macro mitigan los impactos socioeconómicos. Se ha implementado una notable expansión de los programas de protección social para apoyar a los grupos desfavorecidos, pero el alto costo puede generar inestabilidad fiscal.

SARS-CoV-2 es solo uno de los múltiples impactos que han afectado al continente en los últimos años, y es probable que aumente el riesgo de brotes de enfermedades y desastres naturales. Desarrollar resiliencia requerirá sistemas alimentarios que promuevan inversiones inclusivas (IFPRI, 2020; IFPRI, 2021).

Asia y el Pacífico enfrentaron los efectos más severos

La pandemia de SARS-CoV-2 ha aumentado los riesgos para la seguridad alimentaria en Asia y el Pacífico. Debido a las importantes restricciones de viaje, las interrupciones de las cadenas de suministro de alimentos nacionales e internacionales han socavado la disponibilidad y accesibilidad de los alimentos (Kim *et al.*, 2020).

A principios de 2019, la República de China siguió un estricto bloqueo durante dos meses; estos bloqueos causaron impactos inmediatos y a gran escala en etapas com-

pletas de las cadenas de suministro de alimentos, ya que China sustenta las economías de muchos países importantes del continente; una desaceleración en China tiene un impacto significativo en los socios comerciales (Swinnen y McDermott, 2020).

En el suministro de alimentos, el acceso a los insumos agrícolas se convirtió en un desafío. Las inversiones de capital en el sector agrícola se pospusieron o incluso se cancelaron debido al debilitamiento de las perspectivas económicas. Alrededor del 90 % del comercio mundial de bienes se realiza por vía marítima, las instalaciones portuarias interrumpidas impidieron la importación de alimentos.

Además, se impusieron tiempos y costos adicionales para manejar la carga. En varias economías en desarrollo de la región, los precios del arroz y el trigo habían aumentado, en parte debido a las condiciones climáticas adversas en los principales países productores del sudeste asiático, pero más ampliamente debido a las interrupciones de la producción y distribución causadas por la pandemia, combinadas con compras de pánico (IFPRI, 2020; IFPRI, 2021).

Para la demanda de alimentos, el impacto de la pandemia ha variado. Los precios de ciertos alimentos básicos aumentaron debido a las compras de pánico y el acaparamiento. La cadena corta de valor, como la de los cultivos básicos, puede beneficiarse de una demanda constante. En contraste, las cadenas de valor medianas, como los cultivos perecederos, podrían enfrentar una menor demanda debido a las pérdidas de ingresos de los consumidores y el cierre de la industria de servicios de alimentos. Las interrupciones en la cadena de suministro agrícola han afectado de manera desproporcionada a los hogares vulnerables que habían perdido sus trabajos.

El estado nutricional de las personas más expuestas y vulnerables a la crisis de SARS-CoV-2 es motivo de especial preocupación (IFPRI, 2020; IFPRI, 2021).

A medida que los ingresos y los medios de vida de los pobres y vulnerables se vieron amenazados, su acceso a alimentos inocuos, variados y saludables también lo fue, ya que la mayoría de los alimentos ricos en micronutrientes son muy perecederos y vulnerables a las interrupciones en las cadenas de suministro de alimentos y, por lo tanto, a los aumentos de precios (Swinnen y McDermott, 2020).

El mayor impacto en la fuerza laboral global lo padecieron los habitantes de Asia y el Pacífico en el primer trimestre, 115 millones de empleos o una disminución del 6.5 %, y una disminución del 10 % en el segundo trimestre. El sector informal de la región corre un riesgo particular dado su acceso limitado a la protección social y a recibir bajos salarios, lo que requiere realizar múltiples trabajos para mantener los ingresos. El empleo informal registra el nivel más alto en el sur de Asia (89 %), seguido del sudeste asiático (76 %) y Asia central (70 %). Los países con mayor riesgo de empobrecimiento por la crisis son Bangladesh, India y Nepal, ya que 9 de cada 10 trabajadores son informales (Kim *et al.*, 2020).

La pérdida de puestos de trabajo corre un mayor riesgo si las cadenas de suministro agrícola siguen interrumpidas, ya que este sector es el más grande de la región y representa 266 millones de trabajadores, el 37 % del empleo total.

El Banco Mundial ha proyectado una disminución del 20 % en las entradas de remesas

de los trabajadores migrantes a los países de ingresos bajos y medianos en 2020 debido a la pandemia de SARS-CoV-2, y se espera una caída más severa en Asia Central y Asia Meridional.

Dado que la mitad de las remesas se utilizan en gastos relacionados con la agricultura en las comunidades rurales, como resultado, la producción doméstica de alimentos ya se ve afectada (Ponsot *et al.*, 2017).

Apoyo a la seguridad alimentaria en el corto plazo

El Banco Asiático de Desarrollo (ADB) ha apoyado a los consumidores de sus países miembros en desarrollo, aumentando la cobertura, relajando las condiciones comerciales y mejorando los beneficios de los programas de protección social.

Muchos gobiernos han dado alivio financiero y apoyo de liquidez a agricultores, agro-negocios y procesadores de alimentos al extender y relajar las condiciones crediticias. ADB tiene un papel que desempeñar apoyando y fortaleciendo una reserva regional de alimentos o estableciendo un fondo especial de seguridad alimentaria (Kim *et al.*, 2020).

Apoyo a la seguridad alimentaria a mediano y largo plazo

El movimiento hacia la tecnología agrícola es una respuesta a largo plazo para combatir la inseguridad alimentaria, teniendo en cuenta el impacto del cambio climático, la degradación ambiental y la reducción de los recursos naturales, como el agua y la tierra cultivable. Un cambio hacia la mecanización y la agricultura digital también pueden acelerar y hacer que el sector sea más competitivo.

Las reformas políticas deberían promover la transparencia del mercado, el trabajo justo, la planificación digitalizada del uso de la tierra y el control de la calidad de los alimentos. El marketing directo a través de plataformas en línea ayuda a facilitar el comercio, evitar el desperdicio de alimentos y mitigar la pérdida de ganancias de los agricultores al reducir múltiples capas de intermediarios.

Un sistema mejorado de gestión de riesgos de precios, con registros de información del uso de la tierra de cultivo para la producción puede facilitar la planificación colaborativa entre los actores de la cadena de valor agrícola (Kim *et al.*, 2020), combinado con predicciones meteorológicas, llegada al mercado, existencias comercializadas y calendarios de entrega. Por ejemplo, algunos grupos de agricultores indios intercambiaron información mediante plataformas en línea, organizaron su propio transporte de mercancías y vendieron directamente sus productos en mercados no afectados por el confinamiento (Mishra, 2020).

Nueva política de seguridad alimentaria en la Unión Europea

Italia fue el primer país europeo afectado por SARS-CoV-2. Poco después, muchos otros países europeos se vieron afectados por la pandemia.

En toda Europa, aunque la escasez de alimentos no era una amenaza real, ha crecido la preocupación por la resiliencia de los sistemas alimentarios frente a la actual crisis de

SARS-CoV-2 (Vittuari *et al.*, 2021). La crisis aumentó la conciencia sobre la Soberanía Alimentaria, especialmente en la exposición potencial de los sistemas alimentarios a nuevas crisis, en términos de acceso a los alimentos, conducta del consumidor, producciones a pequeña escala y redes alimentarias alternativas (Vittuari *et al.*, 2021).

El confinamiento ha puesto a la región bajo presión y ha aumentado la amenaza de inseguridad alimentaria a largo plazo. La región identifica dos amenazas a la seguridad alimentaria: la escasez de alimentos, que provoca aumentos de precios, y una distribución inequitativa de los alimentos disponibles.

Después de marzo de 2019, el 80 % de los países europeos reportaron un aumento del número de personas que buscan asistencia alimentaria. Más del 25 % de la producción de alimentos depende de trabajadores temporales del exterior. Los cierres de fronteras y la interrupción del movimiento de personas ralentizaron la producción de alimentos (Toffolutti *et al.*, 2020).

La crisis mundial de SARS-CoV-2 ha dejado una huella en la Unión Europea (UE), desde que en mayo de 2020 se presentó la nueva estrategia Farm to Fork (F2F) en política alimentaria, y ha revelado un renovado interés en garantizar, en cualquier pandemia de la naturaleza, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad, situándolas en la estructura central de toda la estrategia F2F.

La Comisión ha reconocido que la actual pandemia de SARS-CoV-2 puede poner en riesgo tanto la seguridad alimentaria como los medios de subsistencia. Para mitigar los riesgos del sistema alimentario y proteger mejor a Europa de perturbaciones similares en el futuro, es esencial reflexionar sobre la resiliencia general de las cadenas de valor tácticas europeas.

La estrategia F2F presenta un nuevo enfoque sobre cómo la UE puede garantizar la seguridad alimentaria en el futuro, mientras produce y maneja alimentos de manera sostenible. El F2F se creó para brindar a los agricultores el apoyo que necesitan para garantizar la seguridad alimentaria en toda la UE (Fortuna, 2020).

Los ejecutivos de la UE también presentaron otra propuesta para aumentar la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas alimentarios: un Observatorio de Seguridad Alimentaria de la UE, para supervisar e informar sobre la capacidad de la UE para garantizar la accesibilidad de los suministros de alimentos, así como la asequibilidad de los alimentos (Comisión Europea, 2020). Además, impulsada por las interrupciones de la cadena de suministro como resultado de la pandemia del coronavirus, la Comisión Europea ha presentado recientemente el Plan de Acción sobre Materias Primas Críticas para liderar la transición verde y digital prevista en el Pacto Verde Europeo. Este Plan de Acción sobre Materias Primas Críticas tiene como objetivo desarrollar cadenas de suministro sólidas ante las dificultades para abastecer los diversos entornos industriales de la UE. Reducir la dependencia de las materias primas a través de la innovación y la creación de productos sostenibles. Aumentar el suministro de materias primas en la UE. Mejorar la diversidad alimentaria para el abastecimiento de los países del tercer mundo evitando las preferencias comerciales internacionales hacia otros lugares con menos necesidad.

Las principales observaciones formuladas por la UE con dichas estrategias implementadas desde el inicio de la pandemia y en lo que va de 2022 son: las medidas de bloqueo favorecieron cadenas de suministro nacionales y globales más formales y consolidadas; las prácticas de producción y distribución de alimentos localizadas y sostenibles tuvieron que enfrentar desafíos, como interrupciones en las cadenas de suministro o demanda debido al bloqueo y la necesidad de identificar nuevos canales de distribución; por lo tanto, se vuelve urgente una política que considere las necesidades y condiciones locales y reconozca los beneficios relacionados con prácticas localizadas y sostenibles de producción y distribución de alimentos, como objetivo principal de la Soberanía Alimentaria (Vittuari *et al.*, 2021).

Análisis global

Los países más desarrollados (D) y moderadamente desarrollados (MD/ND) se encuentran principalmente en las regiones que comprenden Asia, América del Norte y Europa. En contraste, los países con menor desarrollo económico se encuentran en las regiones que comprenden América Latina y África (Cuadro 2).

Debido a la pandemia, se tomaron medidas similares en todas las regiones para combatir la propagación de la enfermedad, como distanciamiento social, restricciones de movimiento, cierre total o parcial de actividades comerciales no esenciales, y en algunos lugares incluso actividades esenciales (Cuadro 3). La educación y muchas actividades laborales debían realizarse desde casa. El análisis de los impactos por región mostró que los efectos socioeconómicos no han sido los mismos.

Los principales impactos sociales de la pandemia son: en primer lugar, el importante número de contagios y muertes, principalmente en las regiones de América (norte, centro y sur), Europa y Asia; en contraste con menos infecciones y muertes en África y Oceanía. Estas situaciones se han relacionado con la movilidad y el contacto social, que son mayores en regiones de alto desarrollo económico y globalización. Otros impactos sociales críticos son las restricciones fronterizas, el cierre de escuelas, el desempleo, el racismo, el aumento del hambre, el aumento de la desnutrición y el nivel de vacunación contra el coronavirus. Se puede observar que el desempleo, el hambre, la desnutrición y el bajo nivel de vacunación se presentan principalmente en aquellas regiones con menor desarrollo, lo que demuestra una disparidad global y poco interés social por aquellas regiones con mayor pobreza (Cuadro 3).

Si bien la crisis económica derivada de la pandemia se ha presentado en todas las regiones, la recuperación ha sido más lenta en América Latina, el Caribe y África que en América del Norte, Asia, el Pacífico y Europa, donde la recuperación económica, a la fecha, es favorable, : aunque no ha alcanzado las tasas previas a la pandemia (Cuadro 3).

La seguridad y soberanía alimentaria han presentado mayor fragilidad en América Latina, el Caribe y especialmente en África. Las importaciones, exportaciones, ingresos y apoyo económico se han visto afectados por los impactos socioeconómicos de la pandemia. Estos impactos han exacerbado el hambre, la desnutrición y la desigualdad

Cuadro 2. Principales países por región y su nivel de desarrollo económico.

Región	Países
Norte América	Canadá (D), Estados Unidos (D), México (MD), países de Centroamérica (MD/ND)
América Latina y el Caribe	La región comprende 33 países, la mayoría de ellos son MD/ND: *El Mercado Común del Sur comprende cinco países de Sudamérica: Argentina (D/MD), Brasil (D/MD), Paraguay, Uruguay (D/MD) y Venezuela. *La Comunidad del Caribe comprende 19 grupos de islas: Antigua y Barbuda, las Bahamas, Barbados, Belice, Dominica, Granada, Guyana, Haití, Jamaica, Montserrat, San Cristóbal y Nieves, Santa Lucía, San Vicente y las Granadinas, Surinam, y Trinidad y Tobago. *La Comunidad Andina que comprende cuatro países: Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú.
África	De los 54 países africanos, la mayoría de ellos son MD/ND: *África del Norte: Argelia (D), Egipto (D), Libia (D), Marruecos (MD), Sudán, Túnez (D), Sahara Occidental (MD). *África Occidental: Benín (ND), Burkina Faso (ND), Cabo Verde (MD), Costa de Marfil (ND), Gambia (ND), Guinea (ND), Guinea-Bissau (ND), Liberia (ND), Malí (ND), Mauritania (ND), Níger (ND), Nigeria (ND), Santa Helena (MD), Senegal (ND), Sierra Leona (ND), Togo (ND). *África Central: Angola (ND), Camerún (MD), República Centroafricana (ND), Chad (ND), República Democrática del Congo (ND), República del Congo (ND), Guinea Ecuatorial (ND), Gabón (D), Santo Tomé & Príncipe (ND). *África Oriental: Burundi (ND), Comoras (ND), Yibuti (ND), Eritrea (ND), Etiopía (ND), Kenia, Madagascar (ND), Malawi (ND), Mauricio (D), Mozambique (ND), Reunión (France), Ruanda (ND), Seychelles (D), Somalia y Somalilandia (ND), Sudán del Sur (ND), Tanzania (ND), Uganda (ND), Zambia (ND), Zimbabue (MD). *África del Sur: Botswana (D), Lesotho (MD), Namibia (MD), Sudáfrica (D), Suazilandia (D).
Asia - Pacífico	Afganistán (ND); Samoa Americana; Armenia; Australia (D); Azerbaiyán; Bangladesh (ND); Bután (ND); Brunei (D), Darussalam; Camboya(ND); Islas Cook; República Popular Democrática de Corea (MD/ND); Fiyi; Polinesia Francesa; Georgia; Guam; Hong Kong (D), China (D); India (MD/ND); Indonesia (MD/ND); Irán (Republica Islámica de); Japón (D); Kazajstán; Kiribati (ND); Kirguistán; República Popular Democrática Lao; Macao (ND), Malasia; Maldivas; Islas Marshall; Micronesia (Estado Federados de); Mongolia; Myanmar (ND); Nauru; Nepal (ND); Nueva Caledonia; Nueva Zelanda (D); Niue; Islas Marianas del Norte; Pakistán; Palaos; Papúa Nueva Guinea; Filipinas (MD/ND); República de Corea (D); Federación Rusa (D); Samoa; Singapur; Islas Salomón (ND); Sri Lanka; Tayikistán; Tailandia (ND); Timor-Leste (ND); Tonga; Turquía; Turkmenistán; Tuvalu (ND); Uzbekistán; Vanuatu (ND); Vietnam (ND)
Europa	Hay 44 países en Europa, la mayoría de ellos son países D y MD.

Desarrollados (D), Medianamente Desarrollados o No Desarrollados (MD/ND).

social; adicionalmente, la producción de alimentos también se ha visto afectada ya que depende en gran medida de insumos que por cierre de empresas o altos costos no han sido posibles de adquirir (Cuadro 3), poniendo en riesgo la soberanía alimentaria, que permite la supervivencia en el medio local.

Finalmente, las regiones más desarrolladas parecen estar medianamente o incluso muy preparadas para enfrentar los impactos socioeconómicos de esta pandemia, ya que han dado una respuesta inmediata a las necesidades de su población en materia de vacunación, una vez dada la aprobación económica y alimentaria de programas de asistencia, diversificación de mercados, entre otras estrategias (Cuadro 4). Por otro

Cuadro 3. Impactos socioeconómicos de la pandemia por SARS-CoV-2 en la seguridad y soberanía alimentaria a nivel mundial.

Región/ Vacunación promedio (%)	Impactos de la pandemia		
	Social	Económico	Seguridad y Soberanía Alimentaria
Norte- américa * 62 %	*El hambre ha aumentado a lo largo de la pandemia: 30 millones de adultos y 12 millones de niños afectados. *Negros y latinos sufren más inseguridad alimentaria. *Aumento de la demanda de alimentos debido a las compras de pánico de los consumidores. *La demanda se desplazó del servicio de alimentos al comercio minorista de alimentos.	*Estados Unidos entró en una crisis económica debido al desempleo y al atraso en los pagos de vivienda. * Canadá, México y el resto del Norte siguen esta tendencia.	*Los mercados agrícolas se mantuvieron regularmente abastecidos y los alimentos asequibles para los consumidores. *Estados Unidos luchó contra la inseguridad alimentaria. *La inseguridad alimentaria aumentó del 54% al 64%. *Dos estudios canadienses reportaron una prevalencia de la inseguridad alimentaria pandémica del 14.8 %.
América Latina y el Caribe: *60 %	*Aumentaron los niveles de hambre e inseguridad alimentaria. *Aumento mayor en relación con otras regiones del mundo de la inseguridad alimentaria de moderada a grave; aumentó en un 9 %. *La educación se ha interrumpido en toda la región.	*El Fondo Monetario Internacional (FMI) reportó una contracción económica de 7.0 % para América Latina y el Caribe en 2020. *Las naciones del Caribe que dependen del turismo tuvieron profundas recesiones económicas, varias con caídas económicas estimadas de más del 15 % en 2020. *Varias naciones sudamericanas se vieron severamente afectadas, con contracciones económicas superiores al 10 %. *La contracción económica en 2020 aumentó la pobreza y exacerbó la desigualdad de ingresos. Informes sobre América Latina y el Caribe estiman que 22 millones de personas en América Latina pasaron a la pobreza en 2020, un 3 % más que en 2019.	*Durante 2020, en América Latina y el Caribe, 60 millones de personas más que en 2019 no tuvieron acceso físico ni económico a alimentos en la cantidad y calidad necesarios para su salud y desarrollo. *En América del Sur, entre 2014 y 2020, la prevalencia de inseguridad alimentaria moderada o severa aumentó un 20.5 %, mientras que en Mesoamérica hubo un aumento de 7.3 % durante el mismo período. *Según la FAO, el índice de precios de los alimentos también experimentó una tendencia a la baja, y los precios del azúcar y el aceite vegetal mostraron las caídas más fuertes: 14.3 % y 5.2 %, respectivamente. *Un descenso en el volumen exportado por la desaceleración del consumo y de la actividad económica de los principales actores comerciales. *El sector agroexportador enfrentó dificultades en sus operaciones por alza de precios y restricciones logísticas.
África: * 12 %	*Distanciamiento social y cierre de fronteras. *Menos vuelos a la región. *El turismo se ve afectado por las restricciones de viaje. *Aumento de la desnutrición y el hambre especialmente en todos los países de ND. *Aumento de la demanda de alimentos debido a las compras de pánico de los consumidores.	*Los crecientes niveles de deuda han llevado a mayores vulnerabilidades. *Limitado ahorro y acceso a redes de seguridad pública. *Aumento del desempleo * *Aumento de la pobreza. *Desaceleración del producto interno bruto (PIB). *Desaceleración de exportaciones de Sudáfrica a China.	*La falta de pesticidas también está obstaculizando los esfuerzos para contener los brotes de plagas, incluido el actual brote de langostas en África oriental. *Alza en los precios de los fertilizantes. *Reducción en la producción, distribución y almacenamiento de alimentos. *Las actividades pesqueras se han reducido en diferentes partes de África. *Aumento de los precios de los alimentos.

Cuadro 3. Impactos socioeconómicos de la pandemia por SARS-CoV-2 en la seguridad y soberanía alimentaria a nivel mundial.

Región/ Vacunación promedio (%)	Impactos de la pandemia		
	Social	Económico	Seguridad y Soberanía Alimentaria
Asia- Pacífico: *65 %	*Movilidad limitada, confinamientos y viajes regulados. *Pérdida de trabajos y jornadas de trabajo reducidas. *Escuelas cerradas. *Los programas de comidas escolares fueron suspendidos, afectando el acceso de niños de escasos recursos a una alimentación sana y equilibrada. *La desaceleración de China tuvo un impacto desproporcionado en los socios de Asia y el Pacífico.	*Las inversiones de capital en el sector agrícola se posponen o incluso se cancelan debido al debilitamiento de las perspectivas económicas. *Tiempo y costos adicionales en el manejo de la carga.	*Cierres de fronteras y bloqueos que limitan el movimiento de bienes y personas. *El acceso a insumos agrícolas, como semillas, fertilizantes y productos para la protección de cultivos—se convirtió en un desafío. *Instalaciones de procesamiento y empaque cerradas debido a cuarentenas. *Interrupciones en la producción y distribución. *Afectaciones en el consumo de alimentos en los hogares debido a bajos ingresos y la movilidad reducida a tiendas de abarrotes, restaurantes y otras tiendas minoristas de alimentos.
Europa: * 64 %	*Muerte y enfermedad de los trabajadores. *Encierros. *Cierres de fronteras y cese en la circulación de personas. *Escasez y restricciones de movimiento.	*El valor de la producción de la industria agrícola disminuyó un 1.4% en 2020 en comparación con 2019. *Los ingresos agrícolas también disminuyeron en comparación con 2019 (-7.9% correspondiente a 7100 millones EUR). *Por el contrario, las ventas minoristas aumentaron con las ventas de alimentos en línea.	*Escasez de alimentos. *Alza de precios se dispara. *Distribución desigual de los alimentos disponibles. *Baja producción.

lado, se han hecho pocos esfuerzos en las regiones menos desarrolladas para mantener su seguridad socioeconómica (Cuadro 4). Estas regiones han mostrado el nivel más bajo de vacunación y un aumento del hambre y la desnutrición, situaciones que no se veían desde la última crisis, lo cual ha significado un retroceso en los esfuerzos para combatir estos problemas regionales de larga data.

Cuadro 4. Acciones de los gobiernos ante los impactos de la pandemia por SARS-CoV-2 en la seguridad y soberanía alimentaria.

Región	Principales acciones de los gobiernos	Referencias
Norte-américa * 62 %	*Garantizar que las familias con dificultades puedan obtener alimentos nutritivos.	* USDA, 2020. * USDA, 2021. * https://covidvax.live/
América Latina y el Caribe	*Un factor importante para la recuperación económica de la región es la disponibilidad y distribución de vacunas. *Muchos países han implementado programas de ayuda Para proteger sus economías y poblaciones vulnerables, utilizando una mayor financiación externa, como el FMI, el Banco Interamericano de Desarrollo y el Banco Mundial.	* FAO <i>et al.</i> , 2021. CEPAL, 2020. * Sullivan & Meyer, 2021. * Van Teijlingen & Hogenboom, 2020. *Schmidhuber <i>et al.</i> , 2020 * https://covidvax.live/ * FAO, 2020e. * Schmidhuber <i>et al.</i> , 2020.
África	*Los programas de protección social se han implementado, pero no lo suficiente.	* UN-WFP, 2020b. * IFPRI, 2020. * IFPRI, 2021. * AAI and GCA, 2020.
Asia-Pacífico	Apoyo inmediato y de corto plazo: *Incrementar la cobertura, relajar las condicionalidades y potenciar los beneficios de los programas de protección social. *Apoyo inmediato para mejorar el acceso de los pequeños agricultores a los mercados. *Proporcionar alivio financiero y apoyo de liquidez a agricultores, agronegocios y procesadores de alimentos con problemas financieros. *Colaboración de los países para evitar la escasez de alimentos y los picos de precios asegurando el libre comercio y fortaleciendo los mecanismos regionales para la seguridad alimentaria. Apoyo a mediano y largo plazo para la cadena de suministro agrícola: *Marketing directo a través de plataformas en línea. *Sistema mejorado de gestión de riesgos de precios. *Movimiento hacia la tecnología agrícola. *Reformas institucionales y legislativas. *Apoyo específico a los agricultores pobres y pequeños a través de reformas agrícolas. *La respuesta de la UE ha sido muy eficaz para preservar la integridad de los mercados locales.	* Kim <i>et al.</i> , 2020. * Swinnen and McDermott, 2020. * IFPRI, 2020. * IFPRI, 2021.
Europa	*La Comisión de la Unión Europea (UE) introdujo ‘los carriles verdes’ para vehículos que transportan productos agroalimentarios para garantizar un movimiento libre y rápido en las fronteras. *Libre circulación de trabajadores agroalimentarios y temporeros para que puedan llegar a su lugar de trabajo y ejercer sus actividades. *La comisión amplió el plazo de solicitud de los agricultores para recibir apoyo en ingresos para los agricultores y las empresas agroalimentarias y garantizar la liquidez. *La estrategia Farm to Fork (F2F) de 2020 demostró un renovado interés por garantizar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad.	* Vittuari <i>et al.</i> , 2021. * Toffolutti <i>et al.</i> , 2020. * European Commission, 2020. * Montanari <i>et al.</i> , 2021.

Las referencias utilizadas para cada región en este cuadro también corresponden a cada región en el Cuadro 1 y el Cuadro 2.

CONCLUSIONES

La actual pandemia ocasionada por SARS-CoV-2 ha impactado diversos sectores productivos en todo el mundo, incluyendo la producción y abasto de alimentos. La desnutrición y la inseguridad alimentaria tienen que ver con el acceso y la interrupción del sistema alimentario, como consecuencia de las fluctuaciones del valor de los activos y de la moneda, así como de la inflación, y todas las oportunidades de intercambio en los aspectos social, comercial, político y cultural.

La preocupación generalizada de que la nutrición se vea afectada por los aumentos de los precios de los alimentos se debe a la gran proporción del gasto en alimentos de los hogares en los países en desarrollo. Los precios de los alimentos tienen un impacto en la distribución del ingreso en la población.

Se requieren mecanismos regionales mejorados para distribuir adecuadamente las reservas de alimentos en el mercado internacional y prepararse para los pronósticos de cosecha positivos, y prevenir la escasez de alimentos y los picos de precios al garantizar el libre comercio para la seguridad alimentaria. La Cooperación Sur-Sur y Triangular son organizaciones para fortalecer los sistemas agrícolas, con el fin de abrir el acceso al mercado mejorando la tecnología y las finanzas agrícolas para los actores clave en las cadenas de suministro de alimentos, como los agricultores familiares y los pequeños propietarios.

Las lecciones aprendidas de esta crisis de salud se utilizan para desarrollar reformas agrícolas buscadas durante mucho tiempo en las economías. El impacto económico último depende de las acciones que se tomen a nivel nacional, regional y global. La seguridad alimentaria y la nutrición requieren una respuesta rápida y una planificación a más largo plazo. La actual pandemia provocada por SARS-CoV-2 está generando una crisis alimentaria, especialmente en áreas vulnerables del mundo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, por el apoyo del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) a Magdalena Mendoza-Sánchez (CVU 228845); como también a la Universidad Autónoma de Querétaro.

REFERENCIAS

- AAI (Africa Adaptation Initiative), GCA (Global Center on Adaptation). 2020. Integrated responses to building climate and pandemic resilience in Africa. <https://www.africaadaptationinitiative.org/assets/AAI-GCA%20Policy%20Brief.pdf> (Retrieved: November 2020).
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2020). Report on the economic impact of coronavirus disease (COVID-19) on Latin America and the Caribbean. <http://hdl.handle.net/11362/45603> (Retrieved: November 2020).
- Diwakar V. 2020. ODI: From pandemics to poverty: the implications of coronavirus for the furthest behind. <https://www.odi.org/blogs/16754-pandemics-poverty-implications-coronavirus-furthest-behind> (Retrieved: October 2020).
- European Commission. 2020. Brussels: Commission announces actions to make Europe's raw materials supply more secure and sustainable. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1542 (Retrieved: December 2020).
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020a. COVID-19 and rural poverty: Supporting and protecting the rural poor in times of pandemic. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8824en>

- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020b. COVID-19 and the risk to food supply chains: How to respond? Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8388en>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020c. The effect of COVID-19 on fisheries and aquaculture in Asia. Bangkok. <https://doi.org/10.4060/ca9545en>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020d. Seguridad Alimentaria Bajo la Pandemia COVID-19. <https://doi.org/10.4060/ca8873es>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2020e. Policy Brief: The Impact of COVID-19 on Food Security and Nutrition. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/sg_policy_brief_on_covid_impact_on_food_security.pdf (Retrieved: November 2020).
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2021. Agricultural trade & policy responses during the first wave of the COVID-19 pandemic in 2020. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4553en>
- FAO (Food and Agriculture Organization), IFAD (International Fund for Agricultural Development), PAHO (Pan American Health Organization), WFP (World Food Programme), UNICEF (United Nations Children's Fund). 2021. Latin America and the Caribbean – Regional Overview of Food Security and Nutrition 2021: Statistics and trends. Santiago, FAO. https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55213/foodsecurityreport2021_eng.pdf?sequence=5&isAllowed=y (Retrieved: November 2020).
- Fortuna G. 2020. Euroactive: Food security again under EU spotlight in the wake of COVID-19 crisis. <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/news/food-security-again-under-eu-spotlight-in-the-wake-of-covid-19-crisis/> (Retrieved: November 2020).
- Gordillo G, Jeronimo OM. 2017. Food Security and Sovereignty. FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/a-ax736e.pdf> (Retrieved: November 2020).
- Headey D, Heidkamp R, Osendarp S, Ruel M, Scott N, Black R, Shekar M, Bouis H, Flory A, Haddad L, Walker N. 2020. Impacts of COVID-19 on childhood malnutrition and nutrition-related mortality. *The Lancet*, 396(10250), 519-521. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31647-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31647-0)
- IFAD (International Fund for Agricultural Development), UNICEF (United Nations Children's Fund), WFP (World Food Programme), WHO (World Health Organization). 2019. The state of food security and nutrition in the World: Safeguarding against economic slowdowns and downturns. FAO. Rome. <https://doi.org/10.4060/CA5162EN>
- IFAD (International Fund for Agricultural Development), UNICEF (United Nations International Children's Emergency Fund), WFP (World Food Programme), WHO (World Health Organization). 2020. The state of food security and nutrition in the World 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets. FAO. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>
- IFPRI (International Food Policy Research Institute). 2020. COVID-19-related trade restrictions on rice and wheat could drive up prices and increase hunger. <https://www.ifpri.org/blog/covid-19-related-trade-restrictions-rice-and-wheat-could-drive-prices-and-increase-hunger> (Retrieved: June 2020).
- IFPRI (International Food Policy Research Institute). 2021. 2021 Global Food Policy Report: Transforming Food Systems after COVID-19. Washington, DC: International Food Policy Research Institute. <https://doi.org/10.2499/9780896293991>
- ILO (International Labour Organization). 2020. COVID-19 and the impact on agriculture and food security [Online]. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/briefingnote/wcms_742023.pdf. Accessed on Apr. 24, 2020 (Retrieved: April 2020).
- Kim K, Kim S, Park CY. 2020. Food Security in Asia and the Pacific amid the COVID-19 Pandemic. <http://dx.doi.org/10.22617/BRF200176-2>
- Mishra M. 2020. Collaborating in a Time of Crisis: Three Early Takeaways from the COVID-19 Response in India. IFAD Blog. 21 April. <https://www.ifad.org/en/web/latest/blog/asset/41885044>. (Retrieved: December 2020).
- Montanari F, Ferreira I, Lofstrom F, Varallo C, Volpe S, Smith E, Kirova M, Wion A, Kubota U, Albuquerque JD. 2021. Research for Agri Committee – Preliminary impacts of the COVID-19 pandemic on European agriculture: a sector-based analysis of food systems and market resilience, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6a5ed385-143e-11ec-b4fe-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-241966924> (Retrieved: November 2020).
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 2020a. COVID-19 and international trade: Issues and actions. https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=128_128542-

- 3ijg8kfswh&title=COVID-19-and-international-trade-issues-and-actions (Retrieved: December 2020).
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 2020b. COVID-19 in Latin America and the Caribbean: An overview of government responses to the crisis. https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=129_129907-eae84sciov&title=COVID-19-in-Latin-America-and-the-Caribbean_An-overview-of-government-responses-to-the-crisis (Retrieved: November 2020).
- Ponsot F, Vásquez B, Terry D, de Vasconcelos P. 2017. Sending Money Home: Contributing to the SDGs, one family at a time. Report to the International Fund for Agricultural Development (June). Rome, Italy: United Nations. <https://www.ifad.org/en/web/knowledge/publication/asset/39407416> (Retrieved: October 2020).
- Poudel PB, Poudel MR, Gautam A, Phuyal S, Tiwari CK, Bashyal N, Bashyal S. 2020. COVID-19 and its Global Impact on Food and Agriculture. <https://doi.org/10.35248/2322-3308.20.09.221>
- Schmidhuber J, Pound J, Qiao B. 2020. COVID-19: Channels of Transmission to Food and Agriculture. <https://doi.org/10.4060/ca8430en>
- Sohrabi C, Alsafi Z, O'Neill N, Khan M, Kerwan A, Al-Jabir A, Iosifidis C, Agha R. 2020. World Health Organization declares global emergency: A review of the 2019 novel coronavirus (COVID-19). *International Journal of Surgery*. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2020.02.034>
- Sullivan MP, Meyer PJ. 2021. Latin America and the Caribbean: impact of COVID-19. Congressional Research Service. <https://sgp.fas.org/crs/tow/IF11581.pdf> (Retrieved: February 2022).
- Sumner A, Hoy C, Ortiz-Juárez E. 2020. Estimates of the Impact of COVID-19 on Global Poverty. *UNU-WIDER*, April, 800-9. <https://doi.org/10.35188/UNU-WIDER/2020/800-9>
- Swinnen J, McDermott J. 2020. COVID-19 and global food security. *Intl Food Policy Res Inst*. <https://doi.org/10.2499/p15738coll2.133762>
- Toffolutti V, Stuckler D, McKee M. 2020. Is the COVID-19 pandemic turning into a European food crisis? *European journal of public health*, 30(4), 626-627. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckaa101>
- UNICEF (United Nations International Children's Emergency Fund). 2020. The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. In Rome FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>
- UN-WFP (United Nations - World Food Programme). 2020a. Global Report on Food Crisis. Joint Analysis for better decisions. https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000114546/download/?_ga=2.222701659.1942350357.1603395668-2088109267.1587703592 (Retrieved: November 2020).
- UN-WFP (United Nations - World Food Programme). 2020b. COVID 19, Economic and Health Impacts on Regional Food and Nutrition Security. <https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000115667/download/> (Retrieved: November 2020).
- USDA (United States Department of Agriculture). 2020. Will COVID-19 Threaten Availability and Affordability of our Food? <https://www.usda.gov/media/blog/2020/04/16/will-covid-19-threaten-availability-and-affordability-our-food> (Retrieved: October 2020).
- USDA (United States Department of Agriculture). 2021. Biden-Harris Administration's Actions to Reduce Food Insecurity Amid the COVID-19 Crisis. <https://www.usda.gov/media/press-releases/2021/03/03/biden-harris-administrations-actions-reduce-food-insecurity-amid> (Retrieved: April 2020).
- UNECLAC (United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean). 2020. Informe especial COVID-19 no. 1 - América Latina y el Caribe ante la pandemia del COVID-19: Efectos económicos y sociales. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45337-america-latina-caribe-la-pandemia-covid-19-efectos-economicos-sociales> (Retrieved: January 2021).
- Van Teijlingen KM, Hogenboom BB. 2020. COVID-19 impact on the value chain in Latin America. <https://www.jstor.org/stable/resrep25676> (Retrieved: February 2022).
- Vittuari M, Bazzocchi G, Blasioli S, Cirone F, Maggio A, Orsini F, Penca J, Petruzzelli M, Specht K, Amghar S, De Menna F. 2021. Envisioning the future of european food systems: approaches and research priorities after COVID-19. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 58. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.642787>
- Weersink A, von Massow M, Bannon N, Ifft J, Maples J, McEwan K, McKendree M, Nicholson C, Novakovic A, Rangarajan A, Richards T, Rude J, Schipanski M, Schnitkey G, Schulz L, Schuurman D, Schwartzkopf-Genswein K, Stephenson M, Thompson J, Wood K. 2021.

- COVID-19 and the agri-food system in the United States and Canada. *Agricultural Systems*, 188, 103039. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103039>
- Wolfson JA, Leung CW. 2020. Food Insecurity During COVID-19: An Acute Crisis with Long-Term Health Implications. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2020.305953>
- WHO (World Health Organization). 2020. WHO: COVID-19 could deepen food insecurity, malnutrition in Africa. Brazzaville. Take it from: <https://www.afro.who.int/news/covid-19-could-deepen-food-insecurity-malnutrition-africa> (Retrieved: November 2020).
- Wouters OJ, Shadlen KC, Salcher-Konrad M, Pollard AJ, Larson HJ, Teerawattananon Y, Jit M. 2021. Challenges in ensuring global access to COVID-19 vaccines: production, affordability, allocation, and deployment. *The Lancet* 397: 1023-1034. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00306-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00306-8)



PREFERENCES OF WINE CONSUMERS FROM DOLORES HIDALGO, GUANAJUATO: A CHOICE EXPERIMENT APPROACH

Araceli **González-Juárez**¹, Juan **Hernández-Ortíz**¹, Miguel Ángel **Martínez-Damián**^{2*}, Enrique **Melo-Guerrero**³, Ramón **Valdivia-Alcalá**¹, Juan Oswaldo **Cervantes-Luna**¹, Fermín **Sandoval-Romero**¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5 Chapingo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56230.

² Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56230.

³ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Av. Universidad km 1, Exhacienda de Aquetzalapa, Tulancingo, Hidalgo, Mexico. C. P. 43600.

* Corresponding author: angel01@colpos.mx

ABSTRACT

The objective of this study was to determine which are the most relevant attributes of wine for consumers of this drink, in the region of Dolores Hidalgo, Guanajuato, Mexico. This with the purpose of providing information that may be useful to wine producers in the decisions to be made. The attributes to be evaluated were origin, variety, aging time in barrels, and price, paying special attention to the influence of the origin attribute. We used the method of choice experiments, for which 120 surveys were applied to wine consumers older than 18 years, in the municipality of Dolores Hidalgo, Guanajuato. Using the mixed logit model, we found that the most valued attribute was the aging time in barrels, followed by origin, and the variety at third place. The favourite product was a wine produced in Guanajuato, in 750 mL bottles, aged in wooden barrels for twelve months, Merlot variety, for which the respondents reported willingness to pay \$750 MXN pesos.

Keywords: wine, choice experiments, logit model.

INTRODUCTION

The study of consumer behaviour involves analysing what they consume, why, when, where, how often and under what conditions, as well as the final result of the process and their satisfaction (Henao and Córdoba, 2007). These types of studies are extremely important for actors or companies that operate in competitive markets. According to Sánchez and Gil (1997), this is a structural characteristic that generally prevails in the wine market.

Wine is a difficult and confusing product for consumers to choose from (Lockshin *et al.*, 2006). This difficulty is due to the immense amount of both extrinsic and intrinsic attributes that wine has in comparison to other products. There are several types of wine: red, white, rosé, sparkling, liqueur, etc. Within each category, the number of characteristics is still very large, starting at the country of origin and Designation of

Citation: González-Juárez A, Hernández-Ortíz J, Martínez-Damián MA, Melo-Guerrero E, Valdivia-Alcalá R, Cervantes-Luna JO, Fermín Sandoval-Romero F. 2022. Preferences of wine consumers from Dolores Hidalgo, Guanajuato: A choice experiment approach. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2774>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 11, 2021.
Approved: March 23, 2022.
Estimated publication date:
April 22, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 359-382.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



Origin for European wines, up to the brand, price, awards, type of container, and labels.

Intrinsic attributes are also important in the wine market; they refer to quality and flavour, vintage, grape variety (or varieties) or alcohol content (Kallas *et al.*, 2012). Since there is a wide range of wines on the market, consumer choices are more difficult than the choice of other goods. That is, the consumer finds himself in a highly segmented market, with high product differentiation and a great proliferation of brands, all of which translates into a high level of uncertainty at the time of making the purchase (Bernabeu *et al.*, 2005). Another important aspect in researching the consumption of goods and services is to determine the structure of consumer preferences for different products. After doing so, producers can offer goods to satisfy the needs expressed in preferences (Lesschaeve, 2007).

Currently the state of Guanajuato, Mexico, is the fourth largest wine producer nationwide with a 4.5 % share, after Baja California (57 %), Coahuila (8.5 %) and Querétaro (5 %) (CMV, 2020). According to the Secretary of Tourism of the State of Guanajuato (2021), several types of projects have been identified in the state: 22 wineries, with vineyard plantations, that produce wines and develop tourism. It also has 11 wine projects with young plantations and two new plantation projects; in addition, Guanajuato has 100 000 ha with wine potential. On the other hand, wine consumption in Mexico has increased in recent years, practically tripled in seven years, going from 450 mL in 2013 to 1.2 L in 2020.

This demand for wine is mostly covered by imported wine, since the production of national wine is only enough to satisfy 30 % of the domestic demand (CMV, 2020). However, with the aim of continuing to promote the production and consumption of Mexican wine, in May 2018, the Mexican Wine Council, together with the National Commission of Governors, launched the campaign “Todos Unidos por el Vino Mexicano” (All United to Support Mexican Wine). This initiative is aimed at increasing the market share in a period of 10 to 15 years, until reaching 45 % of consumption (CONAGO, 2019).

The aforementioned initiative generates the need to strengthen sales strategies for existing wines, as well as for the creation of new products that contain the attributes that consumers demand. To identify the structure of wine consumer preferences in the selection process, an analysis was carried out using the methodology of choice experiments. This method was initially used in market research (marketing) since the 1960s with Luce and Tukey; starting in the 1980s, applications were made in the fields of geography, tourism, transportation, and more recently in the valuation of environmental goods (Espinal and Gómez, 2011).

There are several studies focused on the subject of food, such as the one carried out by Cortiñas *et al.* (2007), where they analyse the formation of consumer preferences for canned asparagus, considering the attributes: brand, origin, and price. In Castilla-La Mancha, Spain, the attributes most valued by wine consumers are price, colour, certifications, and Designation of Origin (Bernabeu *et al.*, 2005). In Catalonia, Spain,

advertising is a key factor to increase consumer awareness of local wines and the most preferred product is a Catalanian wine made with the “Cabernet Sauvignon” variety and previously tasted by the consumer (Kallas *et al.*, 2012).

The objective of this research was to study the preferences of consumers to determine which are the most relevant attributes for wine consumers, in the region of Dolores Hidalgo, Guanajuato, Mexico, in order to provide useful information to wine producers when making strategic decisions. Our hypothesis was that the consumer is capable of distinguishing between attributes and translating them into monetary valuations.

MATERIALS AND METHODS

Study area

This study was carried out in the municipal seat of Dolores Hidalgo, Guanajuato, Mexico. This municipality is located within the most important wine region of the state of Guanajuato, north-central region. The Guanajuato wine museum is located in that municipality.

The choice experiments

Choice experiments belong to the type of stated preference methods (Kallas *et al.*, 2012). The choice experiments methodology involves the generation and analysis of choice data, by constructing a hypothetical market that is presented to respondents (Melo *et al.*, 2020a), where they are asked which product they would buy from a set of competitive products at different prices (Kallas *et al.*, 2012). It involves showing the respondents a series of choice sets (cards) of alternatives that contain common attributes of a product, but with different levels, and asking them to choose the alternative they prefer from each set. Each choice set is between a constant alternative (*status quo*), that is, the current state of the product without implementing a change, and a series of proposed improvement alternatives (at least two).

The choice made by the respondent indicates a preference for the attributes of one alternative over the others, which implies valuing changes in the attributes of the product, which would allow transforming the responses to monetary magnitudes estimates (Espinal and Gómez, 2011).

According to Tudela (2010), choice experiments have a theoretical basis on Lancaster's (1966) consumption choice model, and an econometric basis in random utility models (Luce, 1959; McFadden, 1974). Lancaster breaks with the traditional theory of consumer behaviour by assuming that consumers demand goods by virtue of their characteristics or properties; and that these characteristics generate utility, not the goods themselves. On the other hand, the theory of random utility starts from a perfectly rational individual who always opts for the alternative that will supposedly bring a greater utility.

In choice experiments, subjects choose from a set of options according to a utility function with two components: a systematic (observable) component and a random (unobservable) term as follows:

$$U_{ij} = V_{ij}(Z_j, S_i, M_i) + \varepsilon_{ij}$$

Where:

V_{ij} = Indirect utility function

Z_j = Attribute level

S_i = Socioeconomic characteristics of users

M_i = User income

ε_{ij} = Unobservable random error component

In each alternative of the choice set, the indirect utility function depends on the levels that the attributes take, the socioeconomic characteristics of users and income.

The probability that an individual chooses alternative m over any option j from the choice set C is expressed as the probability that the utility of the first is greater than that of the rest; namely:

$$Pr(im) = Pr[(U_{im} > U_{ij}) \forall j \neq m] = P[(V_{im} - V_{ij}) > (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{im})]$$

The indirect utility function (V) is expressed as a linear model of the parameters in the following form:

$$V_{ij} = \alpha_j + \beta'Z + \gamma(M_i - \text{Tariff}) + \delta'S$$

where: α_j = alternative specific constant; β' = vector of utility coefficients associated with the vector Z of explanatory variables; γ = coefficient associated with the j alternative price tariff; M = individuals' income; δ = vector of coefficients associated with the socioeconomic variables S .

Under the assumption that the error terms are independently and identically distributed, according to a Gumbel or extreme value type I distribution, the probability of choosing the alternative m was expressed with a multinomial logit model (LMN) containing the attributes to be assessed and the characteristics of individuals (McFadden, 1974).

$$Pr(im) = \frac{\exp^{\omega V_{ij}(Z_j, S_i, M_i)}}{\sum_j \exp^{\omega V_{ij}(Z_j, S_i, M_i)}}$$

where: ω = the non-estimable scale parameter, regardless of the function parameters, Álvarez-Farizo *et al.* (2005) normalized to one.

One of the features of the LMN is the implicit assumption of independence of irrelevant alternatives (IIA), which indicates that the disturbances are independent and homoscedastic. When this assumption is not met, biased results are obtained,

therefore the Hausman and McFadden test of independence (Greene, 2003) must be applied. On the other hand, by adding an error component to the random term in the utility function ξ_{ij} , it is possible to model differences in individual preferences, which can be a limitation in the LMN model, generating the mixed logit model.

In this case, the probability that individual i chooses alternative j from the choice set C_i is:

$$P_{ij} = \int \frac{\exp(X_{ij}\beta + \xi_{ij})}{\sum_{k \in C_i} \exp(X_{ik}\beta + \xi_{ik})} f(\xi_{ij} | \gamma) d\xi_{ij}$$

Where ξ_{ij} is an error component term with distribution $f(\xi_{ij} | \gamma)$ and parametric vector γ .

The estimated parameters of the additive model can be interpreted as marginal effects of the attribute of the product to be valued on the probability of choosing one of the plans; in this sense, the marginal willingness to pay (DAPMg) is the willingness to pay for a unit change in each of the intervention areas, while the rest remains constant. The willingness to pay for a marginal change in any of the analysed attributes results from the ratio of dividing the estimated coefficient of each attribute ($-\beta_i$) by the coefficient of the fee attribute (γ) (Alpizar *et al.*, 2001).

Choice experiment design

An analysis of wine production in the state of Guanajuato was carried out, identifying the main types of wine produced (red, rosé, white, etc.), strains produced, time spent by wines in wooden barrels, types of bottles used, region brands, prices, etc. In addition, a review of the literature was made to find out which attributes have been previously used in other studies on wine valuation, where the following stand out: origin (Kallas *et al.*, 2012; Tait *et al.*, 2019), variety (Cerdeña *et al.*, 2010; Araya *et al.*, 2020), and of course the price (Lockshin *et al.*, 2009; Araya *et al.*, 2020). Other attributes considered are the type of bottle, brand, aging, type of cap, etc.

Selection of attributes and levels

Based on the above and according to the objectives of the present study, four attributes were chosen, the first two intrinsic, to assess: grape variety or strain and aging time in barrels; and extrinsic: origin and price (Table 1).

The chosen varieties (or strains) were based on the main varieties produced in the region, while the aging in barrels was set only on the number of months spent in barrels, since in the state there is no Designation of Origin, therefore they cannot be classified as Crianza, Reserva, or Gran Reserva. On the other hand, for setting prices, the average prices of wines already on the market were accounted, as well as the knowledge and recommendations of the staff of the Museo del Vino de Guanajuato (Guanajuato Wine Museum) and the Tres Raíces winery.

Table 1. Assessed attributes and levels of the choice experiment.

Attribute	Level
Origin	Imported National (Mexican) Guanajuato
Variety (strain)	Cabernet Sauvignon Malbec Merlot
Aging (time in months in wooden barrels)	6 12
Price (Mexican pesos, MXN \$)	350 450 550 650

Accounting for the aforementioned attributes and levels, there are 72 possible combinations ($3^2 \times 2^1 \times 4^1$); which means that applying the survey with the same number of cards would be very complicated. Therefore, a fractional factor analysis was used to minimize the correlation between attributes (Bennett and Adamowicz, 2001). Making use of the orthogonal design process in the SPSS® computational package (IBM SPSS Statistics, 2015), 16 cards or alternatives were made. These optimal scenarios are orthogonal (there is no correlation between levels and attributes) and balanced (each level appears in the attribute the same number of times) (Tudela, 2010). Following Melo *et al.* (2020a), the 16 combinations were divided by factorial blocking in order to reduce the number of choice tasks and avoid possible sources of bias; thus, the number of versions (blocks) was included as an additional attribute in the orthogonal design. The procedure generated four different versions of the questionnaire, each containing four choice cards.

Design and implementation of the survey

Following Tudela and Leos (2017), three sections were included in the questionnaire, socioeconomic information of the interviewee, questions to assess goods, and finally the presentation of the alternatives for their choice (Table 2).

The socioeconomic questions and wine evaluation presented were chosen because they were considered relevant for this study; since they allow a better understanding of the reasons for the answers, as well as checking their coherence. To facilitate the application of the questionnaire in questions such as: gender, marital status, educational level, occupation and income level, some options were given, while in questions regarding age and economic dependents interviewees were asked openly. The surveys were carried out personally in the municipality of Dolores Hidalgo, Guanajuato, Mexico from July 8 to 11, 2021 to wine consumers older than 18 years.

Table 2. Example of election card.

Attribute	Options		
	A	B	C
Origin	Guanajuato	Imported	None (If all options are ruled out)
Strain	Merlot	Cabernet Sauvignon	
Aging	Six months	Twelve months	
Price	350	450	

Price shown in MXN pesos.

The surveys were conducted at the main square of the municipality, in restaurants located around it and in the Guanajuato wine museum located in the downtown area of Dolores Hidalgo.

The sample size was determined based on the simple random sampling technique (MAS), using the following formula:

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

where: n = sample size, N = total population of the municipality of Dolores Hidalgo, Guanajuato (163 038 inhabitants) (INEGI, 2020), $p = 0.5$, $q = 0.5$; assuming maximum variance, Z = confidence level $Z=1.96$, which corresponds to a confidence level of 95 % and e = permissible margin of error, which can range from 1 to 9 %; in this study margin used was 9 %. Substituting values in the formula, a sample size of 120 surveys was obtained.

Coding of the attributes to be assessed

Following the scheme developed by Holmes and Adamowicz (2003), codes were used to determine the effects of the attributes, which transferred the category rating scale to code the system that would be used in the econometric analysis.

In this particular case, for example, regarding the origin attribute, if the interviewee chose imported wine, the value 1 was assigned to origin, while national and Guanajuato wines would be assigned 0; if the national level is chosen, it would be assigned 1, and for imported and Guanajuato should be assigned 0. The same procedure was implemented with the other attributes.

RESULTS AND DISCUSSION

General features

Of the 120 respondents, 51.7 % were men and 48.3 % women, the majority between 18 and 35 years old (58.3 %), and 60.8 % said they were single. Regarding the educational level, the participation of those undergraduate (Bachelor) degree was the highest (52.5 %), followed by those with a postgraduate degree (37.5 %); 60 % of those surveyed

said they had between 1 and 4 economic dependents; regarding the level of income, 30.8 % earned incomes from \$7001 to \$15 000 per month, and 30 % reported incomes of more than \$25 000. In third place are those who earn monthly incomes between \$15 001 and \$25 000, accounting for 26.7 % of the respondents, and lastly those who earn less than \$7000 MXN pesos per month with a participation percentage of 12.5 %. Therefore, the average respondent turned out to be a man between the ages of 18 and 35, single, undergraduate (Bachelor) degree, having 1 to 4 economic dependents, and with a monthly income of \$7001 to \$15 000 (Table 3).

Within the wine evaluation questions, the respondents were presented with a list of five attributes and were asked to rank them according to the importance of each of them when choosing a wine. The results showed that the characteristic or attribute that the interviewees considered most important in choosing a wine was the type of wine (red, white, rosé). In second place is the grape variety, followed by the origin; in fourth place, there is the aging time in barrels and in last place the price. The origin, aging and price attributes turned out to be the most important in consumer decision-making in the study carried out by Sánchez and Gil (1997).

Some people said that in addition to the attributes already mentioned, when buying wine, they considered other characteristics, such as the degree of alcohol and the brand. The latter was one of the relevant attributes in the study by Lockshin *et al.*

Table 3. Socioeconomic variables of the interviewed wine consumers (n = 120).

Variable	Description	Quantity	Percentage
Gender	Woman	58	48.3
	Man	62	51.7
Age	18-35 years old	70	58.3
	36-55 years old	45	37.5
	More than 55 years old	5	4.2
Marital status	Single	73	60.8
	Married	47	39.2
	Secondary	1	0.8
Educational level	High school	7	5.8
	Technical career	4	3.3
	Bachelor degree	63	52.5
	Postgraduate	45	37.5
Economic dependents	None	45	37.5
	From 1 to 4	72	60.0
	From 5 to 9	3	2.5
	From \$0 to \$7000	15	12.5
Income	From \$7001 to \$15 000	37	30.8
	\$15 001 to \$25 000	32	26.7
	More than \$25 000	36	30.0
Total		120	100.0

Values based on results from the surveys applied. Prices in MXN pesos.

(2006). The respondents also mentioned other attributes considered important, such as region, price, and awards.

Econometric analysis

The mixed logit model was chosen for this study. In general, in this model the coefficient signs of the explanatory variables were as expected. The variables that are highly significant with 1 % significance are: national, Guanajuato, six months of aging, twelve months of aging, and price. The latter showed a negative sign which is consistent with the economic theory, which indicates that if prices rise consumption will fall. The variable “Merlot” was significant at 10 %, that is, it has a positive contribution to the consumer satisfaction. There was a good fit (0.26) in terms of the adjusted pseudo-R squared. The Chi-square test rejects the hypothesis that the slopes of the model are equal to zero ($p \leq 0.01$) (Table 4).

On the other hand, the socioeconomic characteristics of gender (GEN) and income (ING) reflect the interaction effect with the specific constant for each alternative, with high statistical significance. This means that if they are men and have higher incomes, they have a greater perception of indirect utility in the consumption of wine. The income variable has also been significant in other studies, such is the case of those carried out by Tudela (2010) and Melo *et al.* (2020b), for an improvement plan in the Molino de Flores national park and El Chico national park, respectively. They found that the higher the income, the higher the indirect gain received from the improvements in recovery and conservation of each of the parks.

Table 4. Econometric results of the mixed logit model of the choice experiment.

Variable	Coefficient
National	1.1776 (4.173) [¤]
Guanajuato	1.4411 (4.436) [¤]
Merlot	0.3070 (1.340) [†]
Six months of aging	1.6509 (2.689) [¤]
Twelve months of aging	2.3127 (3.489) [¤]
Price	-0.0054 (-4.334) [¤]
1_GEN1	1.1802 (2.946) [¤]
1_ING1	0.1128 (2.044) [‡]
2_GEN2	1.0458 (2.606) [¤]
2_ING2	0.1673 (2.927) [¤]
Log likelihood	-382.0065
Chi squared	290.6548
Pseudo R-squared	0.2756
Pseudo R-squared adj.	0.2633

Values based on results of N-Logit 4.0. Significant value in [†] $p \leq 0.1$, [‡] $p \leq 0.05$ and [¤] $p \leq 0.01$ and in parentheses, EE: standard error.

Table 5. Marginal willingness to pay (DAPMg) for a change in each attribute.

Wine attributes	DAPMg by levels		Total DAP	Percentage
	Six months	Twelve months		
Aging	305.11	427.42	732.52	57.5
Origin	National 217.63	Guanajuato 266.32	483.95	38.0
Variety	Merlot 56.74		56.74	4.5
Total				100.0

Values calculated based on the mixed logit econometric model.

Analysis of marginal willingness to pay

The marginal willingness to pay (DAPMg) refers to paying for a unit change in this attribute, keeping the other constant. Based on the coefficients of the variables, the estimates of the DAPMg were obtained for each of the explanatory variables (Table 5). The most valued attribute by the interviewees was the barrel aging time, giving preference to wines that spend twelve months in wooden barrels rather than those that spend only six months. This implies that they prefer better quality wines, since according to González (2015), it is possible to raise the quality of a wine through aging. This result agrees with Albisu and Zeballos (2014), who found that the aging time together with the Designation of Origin were the main criteria when choosing a wine. In second place is the attribute of origin, where local wines as those from Guanajuato, are preferred over those produced in other states of the country, which implies that respondents have generated a sense of identity. In addition, in this area wines are greatly promoted through wine tourism. The result agreed with what Kallas *et al.* (2012) reported in their study, where they concluded that local (Catalonian) wine was preferred to wine produced in other regions of Spain. In this sense, Cortiñas *et al.* (2007) determined that origin is of great importance when choosing a product. Finally, there is the variety attribute with correspond to Merlot. This attribute was the most important in the study conducted by Cerda *et al.* (2010). Similarly, the variety attribute was considered in the research conducted by Kallas *et al.* (2012), where the favourite variety was Cabernet Sauvignon followed by Garnacha and Merlot. After considering all the above, the willingness to pay for a wine produced in Guanajuato, aged twelve months in wooden barrels and of the Merlot variety, shall be the sum of the marginal willingness to pay (DapMg) for each level, giving a total of \$750 MXN pesos.

CONCLUSIONS

In this study on preferences of wine consumers in Dolores Hidalgo, Guanajuato, Mexico, conducted under a choice experiment approach, it was found that the

attributes that have the greatest relevance in the choice of a wine are the aging time in barrels. A percentage of more than 50 % prefer wines aged for 12 months over those aged for only 6 months, followed by 38 % choosing origin (at national and state level). Therefore, these two attributes are those that drive the choice behaviour of wine consumers. In third place there is the variety attribute, which in this case was Merlot. Thus, it was concluded that the product preferred by consumers in Dolores Hidalgo, Guanajuato, is a wine from Guanajuato, in a 750 mL bottle, aged in wooden barrels for twelve months, Merlot variety, for which consumers are willing to pay \$750 MXN pesos.

REFERENCES

- Albisu LM, Zeballos MG. 2014. Consumo de vino en España. Tendencias y comportamiento del consumidor. *Economía Cajamar Caja Rural* 14: 99–140.
- Alpizar F, Carlsson F, Martinsson P. 2001. Using choice experiments for non-market valuation. *Working Papers in Economics* 52: 1–37.
- Álvarez-Farizo B, Gil JM, Howard BJ. 2005. Evaluación de impactos ambientales derivados de estrategias de restauración a través de las decisiones de jurados de ciudadanos. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 5 (10): 19–39. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.28787>
- Araya S, Rojas L, Ruiz E. 2020. Importance of packaging in wine preferences: findings in a Chilean wine zone. *Tec Empresarial* 14 (3): 2–15. <https://doi.org/10.18845/te.v14i3.5359>
- Bennett J, Adamowicz W. 2001. Some fundamentals of environmental choice modeling. *In* The choice modelling approach to environmental valuation, Bennett J, Blamey R. (Eds.); Edward Elgar Publishing: Cheltenham, UK, 37–79.
- Bernabeu R, Olmeda M, Díaz M. 2005. Estructura de preferencias de los consumidores de vino y actitudes hacia los vinos con Denominación de Origen. El caso de Castilla-La Mancha. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 5 (9): 57–80. <https://doi.org/10.7201/earn.2005.09.03>
- Cerda A, Torres MJ, García L. 2010. Preferencias y disposición a pagar por vinos ecológicos de parte de los consumidores de la región del Maule, Chile. *Panorama Socioeconómico* 28 (40): 60–70.
- CONAGO (Conferencia Nacional de Gobernadores). 2019. Informe de la comisión de fomento a la industria vitivinícola. https://www.conago.org.mx/reuniones/documentos/2019-04-30/9.2._Informe_CFIV.pdf (Retrieved: January 2020).
- CMV (Consejo Mexicano Vitivinícola). 2020. Consejo Mexicano Vitivinícola. <https://uvayvino.org.mx/index.php> (Retrieved: December 2020).
- Cortiñas M, Chocarro R, Elorz M, Villanueva ML. 2007. La importancia del atributo origen en la elección de productos agroalimentarios. El caso del espárrago de Navarra. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 7 (13): 57–90.
- Espinal NE, Gómez JD. 2011. Experimentos de elección: una metodología para hacer valoración económica de bienes de no mercado. *Ensayos de Economía* 21 (38): 211–242.
- Greene WH. 2003. *Econometric Analysis*. Prentice Hall. New Jersey, USA. 193 p.
- González S. 2015. Cadena de valor económico del vino de Baja California, México. *Estudios Fronterizos* 16 (32): 163–193.
- Henao O, Córdoba JF. 2007. Comportamiento del consumidor, una mirada sociológica. *Entramado* 3 (2): 18–29.
- Holmes T, Adamowicz W. 2003. Attribute-based methods. *In* A primer nonmarket valuation, Champ P, Boyle K, Brown T. (Eds.); Springer: New York, USA, 171–219. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0826-6_6
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021. http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gto/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=11 (Retrieved: March 2021).
- Kallas Z, Escobar C, Gil JM. 2012. Assessing the impact of a Christmas advertisement campaign on Catalan wine preference using choice experiments. *Appetite* 58 (1): 285–298. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2011.09.017>
- Lancaster K. 1966. A new approach to consumer theory. *Journal of Political Economy* 74 (2): 132–157. <https://doi.org/10.1086/259131>

- Lesschaeve I. 2007. Sensory evaluation of wine and commercial realities: Review of current practices and perspectives. *American Journal of Enology and Viticulture* 58: 252–258. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/58/2/252.full.pdf> (Retrieved: July 2021).
- Lockshin L, Jarvis W, d’Hauteville F, Perrouy JP. 2006. Using simulations from discrete choice experiments to measure consumer sensitivity to brand, region, price, and awards in wine choice. *Food Quality and Preference* 17: 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.03.009>
- Lockshin L, Mueller S, Louviere J, Francis L, Osidacz P. 2009. Development of a New Method to Measure How Consumers Choose wine. *The Australian and New Zealand Wine Industry Journal* 24 (2): 37–42.
- Luce D. 1959. Individual choice behaviour. Dover Publications: New York, USA. 155 p.
- McFadden D. 1974. Conditional logit analysis of qualitative choice behaviour. *In* *Frontiers in Econometrics*, Zarembka P. (ed.) Academic Press. New York, USA. pp: 105–142.
- Melo E, Rodríguez R, Martínez MA, Hernández J, Razo R. 2020a. Consideraciones básicas para la aplicación de experimentos de elección discreta: una revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11 (59): 4–30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.676>
- Melo E, Rodríguez R, Martínez MA, Hernández J, Razo R. 2020b. Preferencias sociales para el manejo del Parque Nacional El Chico, mediante experimentos de elección. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11 60: 26–49. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.713>
- Sánchez M, Gil JM. 1997. Análisis de la estructura de preferencias y de las actitudes hacia los vinos tintos con “Denominación de Origen”. *ESIC MARKET* 97: 151–172.
- Secretaría de Turismo del Estado de Guanajuato. 2021. Actividad vinícola en Guanajuato. <https://sectur.guanajuato.gob.mx/#> (Retrieved: July 2021).
- Tait P, Saunders C, Dalziel P, Rutherford P, Driver T, Guenther M. 2019. Estimating wine consumer preferences for sustainability attributes: A discrete choice experiment of Californian Sauvignon blanc purchasers. *Journal of Cleaner Production* 233: 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.076>
- Tudela JW. 2010. Experimentos de elección en la priorización de políticas de gestión en áreas naturales protegidas. *Desarrollo y Sociedad* 66: 183–217.
- Tudela JW, Leos JA. 2017. Herramientas Metodológicas para Aplicaciones del Experimento de Elección. Universidad Autónoma Chapingo. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. México. Chapingo, México.

PREFERENCIAS DE LOS CONSUMIDORES DE VINO DE DOLORES HIDALGO, GUANAJUATO: UN ENFOQUE DE EXPERIMENTOS DE ELECCIÓN

Araceli **González-Juárez**¹, Juan **Hernández-Ortiz**¹, Miguel Ángel **Martínez-Damián**^{2*}, Enrique **Melo-Guerrero**³,
Ramón **Valdivia-Alcalá**¹, Juan Oswaldo **Cervantes-Luna**¹, Fermín **Sandoval-Romero**¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5 Chapingo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56230.

² Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56230.

³ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Av. Universidad km 1, Exhacienda de Aquetzalapa, Tulancingo, Hidalgo, Mexico. C. P. 43600.

* Autor para correspondencia: angel01@colpos.mx

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar cuáles son los atributos más relevantes del vino para los consumidores de esta bebida, en la región de Dolores Hidalgo, Guanajuato, México. Esto con la finalidad de proveer información que sea de utilidad a los productores vitivinícolas para tomar decisiones. Los atributos a valorar fueron: origen, variedad, tiempo de crianza en barricas y precio, prestando especial atención a la influencia del atributo origen. Se aplicó el método de experimentos de elección, para lo cual se aplicaron 120 encuestas a consumidores de vino mayores de 18 años, en el municipio de Dolores Hidalgo, Guanajuato. Mediante el modelo logit mixto se encontró que el atributo más valorado fue el tiempo de crianza en barricas, seguido por origen y el tercer lugar lo ocupó la variedad. El producto preferido es un vino Guanajuatense, en botella de 750 mL, con una crianza en barricas de madera de doce meses y de la variedad Merlot, por el cual se está dispuesto a pagar un precio de 750 pesos mexicanos.

Palabras clave: vino, experimentos de elección, modelo logit.

INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento del consumidor implica analizar qué consume, por qué, cuándo, dónde, con qué frecuencia y en qué condiciones, así como el resultado final del proceso y la satisfacción del sujeto (Henao y Córdoba, 2007). Este tipo de estudios resultan de suma importancia para los actores o empresas que operan en mercados competitivos. De acuerdo con Sánchez y Gil (1997) esta es una característica estructural que en general predomina en el mercado vitivinícola. El vino es un producto difícil y confuso para que los consumidores elijan (Lockshin *et al.*, 2006). Dicha dificultad se debe a la inmensa cantidad de atributos tanto extrínsecos como intrínsecos que posee el vino en comparación con otros productos. Existen varios tipos de vino: tinto, blanco, rosado, espumoso, licoroso, etc. Dentro de cada categoría, la cantidad de características es todavía muy grande, desde el país de origen —y para

Citation: González-Juárez A, Hernández-Ortiz J, Martínez-Damián MA, Melo-Guerrero E, Valdivia-Alcalá R, Cervantes-Luna JO, Fermín Sandoval-Romero F. 2022. Preferences of wine consumers from Dolores Hidalgo, Guanajuato: A choice experiment approach. *Agrociencia*, 56(2). <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2774>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 11, 2021.
Approved: March 23, 2022.
Estimated publication date:
April 22, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 359-382.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



los vinos europeos también las Denominaciones de Origen—, hasta la marca, el precio, premios, tipo de envase y etiquetas.

Los atributos intrínsecos también son importantes en el mercado del vino, estos se refieren a la calidad y el sabor, la cosecha, la variedad de uva (o variedades) y/o el contenido de alcohol (Kallas *et al.*, 2012). Dado que existe una extensa gama de vinos en el mercado, las elecciones de los consumidores son más difíciles que la elección de otros bienes, es decir, el consumidor se encuentra en un mercado muy segmentado, con una elevada diferenciación de producto y gran proliferación de marcas lo que se traduce en un alto nivel de incertidumbre en el momento de realizar la compra (Bernabeu *et al.*, 2005). Otro aspecto importante en las investigaciones sobre el consumo de bienes y servicios es determinar la estructura de preferencias de los consumidores por diferentes productos, al hacerlo los productores pueden ofrecer bienes para satisfacer las necesidades expresadas en dichas preferencias (Lesschaeve, 2007).

Actualmente el estado de Guanajuato, México, es el cuarto productor de vino a nivel nacional con un 4.5 % de participación, después de Baja California (57 %), Coahuila (8.5 %) y Querétaro (5 %) (CMV, 2020), y de acuerdo con la Secretaría de Turismo del Estado de Guanajuato (2021) en la entidad se tienen identificados varios tipos de proyectos: 22 bodegas vitivinícolas con plantaciones de viñedos que elaboran vino y atienden al turismo, 11 proyectos vinícolas con plantaciones jóvenes y 2 proyectos nuevos de plantación, además Guanajuato cuenta con 100 000 hectáreas con potencial vitivinícola.

Por otro lado, el consumo de vino en México aumentó en los últimos años, en siete años prácticamente se triplicó, al pasar de 450 mL en 2013 a 1.2 L en 2020. Esta demanda de vino se cubre principalmente por vino importado, ya que la producción de vino nacional solo alcanza para satisfacer el 30 % de la demanda interna (CMV, 2020). Sin embargo, con el objetivo de seguir impulsado la producción y el consumo del vino mexicano, en mayo de 2018, el Consejo Mexicano Vitivinícola, en conjunto con la Comisión Nacional de Gobernadores lanzaron la campaña Todos Unidos por el Vino Mexicano. Esta iniciativa pretende que en un lapso de 10 a 15 años se incremente la participación del mercado hasta alcanzar el 45 % del consumo (CONAGO, 2019).

Lo anterior genera la necesidad de fortalecer las estrategias de ventas de los vinos ya existentes, así como para la creación de nuevos productos que contengan los atributos que los consumidores demandan.

Para identificar la estructura de las preferencias de los consumidores de vino en el proceso de elección, se realizó un análisis mediante la metodología de experimentos de elección. Este método inicialmente fue utilizado en investigaciones de mercados (marketing) desde los años 60 con Luce y Tukey; a partir de la década de los ochenta se hacen aplicaciones en los campos de la geografía, el turismo, el transporte, y más recientemente en la valoración de bienes ambientales (Espinal y Gómez, 2011). Existen diversos estudios enfocados en el tema de los alimentos tales como el realizado por Cortiñas *et al.* (2007), donde analizan la formación de preferencias de los consumidores de espárrago enlatado, tomando en cuenta los atributos: marca, origen y precio.

En Castilla-La Mancha, España, los atributos más valorados por los consumidores de vino son: el precio, el color, certificación y el origen (Bernabeu *et al.*, 2005). En Cataluña, España, la publicidad es un factor clave para incrementar la conciencia de los consumidores por los vinos locales y el producto más preferido es un vino catalán elaborado con la variedad “Cabernet Sauvignon” y catado previamente por el consumidor (Kallas *et al.*, 2012).

Esta investigación tuvo como objetivo estudiar de las preferencias de los consumidores para determinar cuáles son los atributos más relevantes para los consumidores de vino, en la región de Dolores Hidalgo, Guanajuato, México, con la finalidad de proveer información que sea de utilidad a los productores vitivinícolas para tomar decisiones estratégicas. La hipótesis manifiesta que el consumidor es capaz de distinguir entre atributos y traducirlos en valoraciones monetarias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la cabecera municipal de Dolores Hidalgo, Guanajuato, México. Este municipio se encuentra dentro de la región vitivinícola más importante del estado de Guanajuato, en la región centro-norte del mismo. En este municipio se encuentra el museo del vino de Guanajuato.

Los experimentos de elección

Los experimentos de elección pertenecen al tipo de métodos de preferencias declaradas (Kallas *et al.*, 2012). La metodología de experimentos de elección involucra la generación y análisis de datos de elección, mediante la construcción de un mercado hipotético que se presenta a los encuestados (Melo *et al.*, 2020a), donde se pregunta a las personas qué producto comprarían de un conjunto de productos competitivos a diferentes precios (Kallas *et al.*, 2012). Se trata de mostrar a las personas encuestadas una serie de conjuntos de elección (tarjetas) de alternativas que contienen atributos comunes de un bien, pero con diferentes niveles, y se pide que elijan la alternativa que prefieren de cada conjunto. Cada conjunto de elección es entre una alternativa constante (*status quo*), es decir, el estado actual en el cual se encuentra el bien sin la implementación de algún cambio, y una serie de alternativas de mejora propuestas (al menos dos). La elección realizada por el encuestado indica una preferencia por los atributos de una alternativa respecto a las otras; lo que implica valorar cambios en los atributos del bien, lo que permitirá transformar las respuestas a estimaciones en magnitudes monetarias (Espinal y Gómez, 2011).

De acuerdo con Tudela (2010), los experimentos de elección tienen una base teórica en el modelo de elección de consumo de Lancaster (1966) y una base econométrica en los modelos de utilidad aleatoria (Luce, 1959; McFadden, 1974). Lancaster rompe con la teoría tradicional del comportamiento del consumidor al suponer que éste demanda bienes en virtud de sus características o propiedades, y que son esas características, y no los bienes en sí, las que generan utilidad. Por su parte, la teoría de la utilidad alea-

toría parte de un individuo perfectamente racional que siempre opta por la alternativa que le supone una mayor utilidad.

En los experimentos de elección, los sujetos eligen entre alternativas de un conjunto de opciones de acuerdo con una función de utilidad con dos componentes: un componente sistemático (observable) y un término aleatorio (no observable) de la siguiente manera:

$$U_{ij} = V_{ij}(Z_j, S_i, M_i) + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

V_{ij} = Función de utilidad indirecta

Z_j = Nivel de los atributos

S_i = Características socioeconómicas de los usuarios

M_i = Ingreso de los usuarios

ε_{ij} = Componente no observable de error aleatorio

En cada alternativa del conjunto de elección, la función de utilidad indirecta depende de los niveles que tomen los atributos, las características socioeconómicas de los usuarios y del ingreso.

La probabilidad de que un individuo elija la alternativa m sobre cualquier opción j del conjunto de elección C , se expresa como la probabilidad de que la utilidad de la primera sea mayor que la del resto; es decir:

$$Pr(im) = Pr[(U_{im} > U_{ij}) \forall j \neq m] = P[(V_{im} - V_{ij}) > (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{im})]$$

La función de utilidad indirecta (V) se expresa como un modelo lineal de los parámetros en la forma siguiente:

$$V_{ij} = \alpha_j + \beta'Z + \gamma(M_i - \text{Tarifa}) + \delta'S$$

donde:

α_j = constante específica para cada alternativa

β' = vector de coeficientes de utilidad asociado con el vector Z de variables explicativas

γ = coeficiente asociado al precio de la alternativa j , tarifa j

M = ingreso del individuo

δ = vector de coeficientes asociado a las variables socioeconómicas S

Bajo el supuesto de que los términos de error se distribuyen idéntica e independientemente de acuerdo a una distribución de Gumbel o de valor extremo tipo I, la probabilidad de elegir la alternativa m se expresó con un modelo logit multinomial (LMN) que contiene los atributos por valorar y las características de los individuos (McFadden, 1974).

$$\Pr(im) = \frac{\exp^{\omega v_{ij}(Z_j, S_i, M_i)}}{\sum_j \exp^{\omega v_{ij}(Z_j, S_i, M_i)}}$$

Donde: ω = Parámetro de escala no estimable, independientemente de los parámetros de la función (Álvarez-Farizo *et al.*, 2005), se normaliza como uno.

Una de las características del LMN es el supuesto implícito de independencia de las alternativas irrelevantes (IIA por sus siglas en inglés) que indica que las perturbaciones son independientes y homocedásticas. Cuando este supuesto no se cumple se tienen resultados sesgados, por lo que se debe aplicar la prueba de independencia de Hausman y McFadden (Greene, 2003).

Por otra parte añadiendo un componente de error al término aleatorio en la función de utilidad ξ_{ij} es posible modelar diferencias en preferencias individuales, lo que puede ser una limitante en el modelo LMN generando el modelo logit mixto. En este caso la probabilidad de que el individuo i elija la alternativa j del conjunto de elección C_i es:

$$P_{ij} = \int \frac{\exp(X_{ij}\beta + \xi_{ij})}{\sum_{C \in C_i} \exp(X_{ik}\beta + \xi_{ik})} f(\xi_{ij} | \gamma) d\xi_{ij}$$

Donde ξ_{ij} es un término de componente de error con distribución $f(\xi_{ij} | \gamma)$ y vector paramétrico γ .

Los parámetros estimados del modelo aditivo pueden interpretarse como efectos marginales del atributo del bien a valorar sobre la probabilidad de elegir uno de los planes; en este sentido, la disponibilidad marginal a pagar (DAPMg) es la disponibilidad a pagar por un cambio unitario en cada una de las áreas de intervención, mientras que el resto se mantiene constante. La disposición al pago por un cambio marginal en cualquiera de los atributos analizados resulta de dividir el coeficiente estimado de cada atributo ($-\beta_i$) entre el coeficiente del atributo tarifa (γ) (Alpizar *et al.*, 2001).

Diseño del experimento de elección

Se realizó un análisis sobre la producción de vino en el estado de Guanajuato, identificando los principales tipos de vino que se producen (tintos, rosados, blancos, etc.), cepas producidas, tiempo que pasan los vinos en barricas de madera, tipos de botellas utilizadas, marcas de la región, precios, etc. Además, se hizo una revisión de literatura para conocer que atributos han sido previamente utilizados en otros estudios sobre valoración de vino, donde destacan: origen (Kallas *et al.*, 2012; Tait *et al.*, 2019), cepa (Cerdeira *et al.*, 2010; Araya *et al.*, 2020) y por supuesto el precio (Lockshin *et al.*, 2009; Araya *et al.*, 2020). Otros atributos que se han tomado en cuenta son el tipo de botella, marca, añejamiento, tipo de tapa, etc.

Selección de atributos y niveles

Con base en lo anterior y de acuerdo a los objetivos de la investigación se eligieron cuatro atributos a valorar tanto intrínsecos: variedad o cepa de la uva y tiempo de añejamiento en barricas; como extrínsecos: origen y el precio (Cuadro 1).

Las variedades o cepas elegidas fueron con base en las principales variedades que se producen en la región, mientras que el añejamiento en barricas se fijó solamente en el número de meses que pasan en barricas, ya que en el estado no se cuenta con denominación de origen, por lo que no se pueden clasificar como crianza, reserva y gran reserva. Por otro lado, para la fijación de precios se tomaron en cuenta los precios promedio de los vinos ya existentes en el mercado, así mismo se tomó en cuenta el conocimiento y recomendaciones del personal del Museo del Vino de Guanajuato y de la vitivinícola Tres Raíces.

Tomando en cuenta los atributos y niveles antes mencionados, existen 72 combinaciones posibles ($3^2 \times 2^1 \times 4^1$), por lo que aplicar la encuesta con igual número de tarjetas sería muy complicado, así que se recurrió al análisis factorial fraccionado que minimiza la correlación entre atributos (Bennett y Adamowicz, 2001). Haciendo uso del proceso de diseño ortogonal en el paquete computacional SPSS® (IBM SPSS Statistics, 2015); se elaboraron 16 tarjetas o alternativas. Estos escenarios óptimos son ortogonales (no existe correlación entre niveles y atributos) y equilibrados (cada nivel aparece en el atributo el mismo número de veces) (Tudela, 2010).

Siguiendo a Melo *et al.* (2020a), las 16 combinaciones se dividieron mediante el bloque factorial con la finalidad de disminuir el número de tareas de elección y evitar posibles fuentes de sesgo, para ello en el diseño ortogonal se incluyó el número de versiones (bloques) como un atributo adicional. El procedimiento generó cuatro versiones diferentes del cuestionario, cada uno contenía cuatro tarjetas de elección.

Table 1. Assessed attributes and levels of the choice experiment.

Atributo	Nivel
Origen	Importado
	Nacional (mexicano)
	Guanajuato
Variedad (cepa)	Cabernet Sauvignon
	Malbec
	Merlot
Añejamiento (tiempo en meses en barricas de madera)	6
	12
Precio (pesos mexicanos)	350
	450
	550
	650

Diseño e implementación de la encuesta

Tomando en cuenta a Tudela y Leos (2017), en el cuestionario se incluyeron tres apartados: información socioeconómica del entrevistado, preguntas de valoración de bien y finalmente la presentación de las alternativas para su elección (Cuadro 2). Las preguntas socioeconómicas y valoración del vino planteadas fueron elegidas por considerarse relevantes para la investigación, ya que permiten entender mejor las razones de las respuestas, así como para comprobar la coherencia de las respuestas. Para facilitar la aplicación del cuestionario en preguntas como: género, estado civil, nivel de estudios, ocupación y nivel de ingresos, se dieron opciones; mientras que en preguntas sobre la edad y dependientes económicos se hicieron de forma abierta.

Las encuestas se realizaron de manera personal en el municipio de Dolores Hidalgo, Guanajuato, del 8 al 11 de julio de 2021 a consumidores de vino mayores de 18 años, las encuestas se realizaron en la plaza principal del municipio, restaurantes ubicados alrededor de la misma y en el museo del vino de Guanajuato que se encuentra en la zona centro de Dolores Hidalgo.

El tamaño de la muestra se determinó con base a la técnica de muestreo aleatorio simple (MAS), mediante la siguiente fórmula:

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

Donde: n = tamaño de la muestra, N = total de la población del municipio de Dolores Hidalgo, Guanajuato (163 038 habitantes) (INEGI, 2020), $p = 0.5$, $q = 0.5$ asumiendo máxima varianza, Z = nivel de confianza $Z = 1.96$ que corresponde a un nivel de confianza del 95 % y e = margen de error permisible, que puede ir del 1 % al 9 %, en este estudio se trabaja con 9 %. Sustituyendo valores en la fórmula, se obtuvo un tamaño de muestra de 120 encuestas.

Codificación de los atributos a valorar

Siguiendo el esquema desarrollado por Holmes y Adamowicz (2003), se utilizan códigos para determinar los efectos de los atributos, el cual traslada la escala de calificación de categorías para codificar el sistema que será usado en el análisis econométrico.

Cuadro 2. Ejemplo de tarjeta de elección.

Atributo	Options		
	A	B	C
Origen	Guanajuato	Importado	Ninguna
Cepa	Merlot	Cabernet Sauvignon	(Si rechaza todas las alternativas)
Añejamiento	Seis meses	Doce meses	
Precio	350	450	

El precio está dado en pesos mexicanos.

Para este caso en particular, por ejemplo, en cuanto al atributo origen, si el entrevistado elige el vino importado a éste se le asigna el valor 1, mientras que a nacional y a Guanajuato se le asignara 0; si de otro modo se elige el nivel nacional a éste se le asignará el 1 y a importado y Guanajuato se les asignara el 0. Se hace del mismo modo con los demás atributos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aspectos generales

De los 120 encuestados, se encontró que 51.7 % fueron hombres y el 48.3 % mujeres, la mayoría en una edad de entre 18 y 35 años (58.3 %), el 60.8 % afirmó estar soltero, en cuanto al nivel de estudios la participación de personas con licenciatura fue la más alta (52.5 %), seguida por los que cuentan con algún posgrado (37.5 %), el 60 % de los encuestados dijeron tener de 1 a 4 dependientes económicos; respecto al nivel de ingresos, el 30.8 % obtiene ingresos de \$7001 a \$15 000 mensuales, el 30 % tiene ingresos de más de \$25 000. En tercer lugar, se encuentran los que obtienen ingresos mensuales de entre \$15 001 y \$25 000 con un 26.7 % y por último los que obtienen menos de \$7,000 pesos mexicanos mensuales con un porcentaje de participación del 12.5 %. Por lo que el encuestado promedio resultó ser un hombre de una edad de entre 18 y 35 años, soltero, con licenciatura, teniendo de 1 a 4 dependientes económicos y con ingresos mensuales de \$7001 a \$15 000 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Variables socioeconómicas de los consumidores de vino entrevistados (n = 120).

Variable	Descripción	Cantidad	Porcentaje
Género	Mujer	58	48.3
	Hombre	62	51.7
Edad	18-35 años	70	58.3
	36-55 años	45	37.5
	Más de 55 años	5	4.2
Estado civil	Soltero	73	60.8
	Casado	47	39.2
	Secundaria	1	0.8
Nivel de estudios	Preparatoria	7	5.8
	Carrera técnica	4	3.3
	Licenciatura	63	52.5
Dependientes económicos	Posgrado	45	37.5
	Ninguno	45	37.5
	De 1 a 4	72	60.0
Ingreso	De 5 a 9	3	2.5
	De \$0 a \$7000	15	12.5
	De \$ 7,001 a \$15 000	37	30.8
	De \$15,001 a \$25 000	32	26.7
	Más de \$25 000	36	30.0
Total		120	100.0

Fuente: Elaboración propia con resultados de las encuestas realizadas. Los precios están dados en pesos mexicanos.

Dentro de las preguntas de valoración del vino, se les presentó a los encuestados un listado de cinco atributos y se les pidió que los ordenaran de acuerdo a la importancia que tiene cada uno de ellos a la hora de elegir un vino, los resultados arrojaron que la característica o atributo que los entrevistados consideraron más importante para elegir un vino, fue el tipo de vino (ej. tinto, blanco, rosado). El segundo lugar lo ocupa la variedad de uva, seguido del origen, en cuarto lugar, se encuentra el tiempo de añejamiento en barricas y en último lugar el precio. Los atributos origen, añejamiento y precio resultaron ser los más importantes en la toma de decisiones de los consumidores en la investigación realizada por Sánchez y Gil (1997).

Algunas personas mencionaron que además de los atributos ya mencionados, al momento de realizar la compra de vino, toman en cuenta otras características, como el grado de alcohol y marca, éste último fue uno de los atributos relevantes en el estudio hecho por Lockshin *et al.* (2006), los encuestados mencionaron que además de éste toman en cuenta otros atributos tales como la región, precio y premios.

Análisis econométrico

Se optó por el modelo logit mixto para este estudio. En general, en este modelo los signos de los coeficientes de las variables explicativas son los esperados. Las variables que son altamente significativas al 1 % de significancia, son: nacional, Guanajuato, seis meses de crianza, doce meses de crianza y precio, ésta última presentó un signo negativo lo cual resulta consistente con la teoría económica, que indica que a mayores precios la cantidad consumida disminuirá. La variable "Merlot" resultó significativa al 10 %, es decir, que tiene una contribución positiva a la utilidad del consumidor. Hay un buen ajuste (0.26) en términos del pseudo R-cuadrado ajustado. La prueba de Chi-cuadrada rechaza la hipótesis de que las pendientes del modelo son iguales a cero ($p \leq 0.01$) (Cuadro 4).

Por otro lado, las características socioeconómicas género (GEN) e ingreso (ING) reflejan el efecto interacción con las constantes específicas para cada alternativa, con altos niveles de significancia estadística, esto significa que si son hombres y se tienen mayores ingresos se tiene una mayor percepción de utilidad indirecta ante el consumo del vino. La variable ingreso ha resultado significativa también en otras investigaciones, tal es el caso de las investigaciones realizadas por Tudela (2010) y Melo *et al.* (2020b), para un plan de mejora en el Parque Nacional Molino de Flores y en el Parque Nacional El Chico, respectivamente, y encontraron que a mayores ingresos mayor es la utilidad indirecta se percibe por las mejoras en recuperación y conservación de cada uno de los parques.

Análisis de la disponibilidad a pagar marginal

La disponibilidad a pagar marginal (DAPMg) es la disponibilidad a pagar por un cambio unitario en este atributo, manteniendo los demás constantes.

Con base en los coeficientes de las variables se realizó el cálculo de la DAPMg para cada una de las variables explicativas (Cuadro 5).

Cuadro 4. Resultados econométricos del modelo logit mixto del experimento de elección.

Variable	Coefficiente
Nacional	1.1776 (4.173) ^a
Guanajuato	1.4411 (4.436) ^a
Merlot	0.3070 (1.340) ⁺
Seis meses de crianza	1.6509 (2.689) ^a
Doce meses de crianza	2.3127 (3.489) ^a
Precio	-0.0054 (-4.334) ^a
1_GEN1	1.1802 (2.946) ^a
1_ING1	0.1128 (2.044) [¶]
2_GEN2	1.0458 (2.606) ^a
2_ING2	0.1673 (2.927) ^a
Log likelihood	-382.0065
Chi squared	290.6548
Pseudo R-squared	0.2756
Pseudo R-squared adj.	0.2633

Valor significativo en ⁺ $p \leq 0.1$, [¶] $p \leq 0.05$ y ^a $p \leq 0.01$ y entre paréntesis, EE: error estándar

Fuente: Elaboración propia con base a resultados de N-Logit 4.0

Cuadro 5. Disponibilidad marginal a pagar (DAPMg) por un cambio en cada atributo.

Atributos del vino	DAPMg por niveles		DAP total	Porcentaje
Crianza	Seis meses	Doce meses	732.52	57.5
	305.11	427.42		
Origen	Nacional	Guanajuato	483.95	38.0
	217.63	266.32		
Variedad	Merlot		56.74	4.5
	56.74			
Total				100.0

Fuente: Elaboración propia sobre la base del modelo econométrico logit mixto.

El atributo más valorado por los entrevistados fue el tiempo de crianza en barrica, dándole preferencia a los vinos que pasan doce meses en barricas de madera antes que los que pasan solo seis meses. Lo que implica que prefieren vinos de mejor calidad, ya que de acuerdo con González (2015) para elevar la calidad de un vino es posible mejorar sus cualidades mediante el envejecimiento o crianza. Este resultado concuerda con Albisu y Zeballos (2014), quienes encontraron que el tiempo de crianza junto con la denominación de origen eran los principales criterios a la hora de elegir un vino.

En segundo lugar, de importancia se encuentra el atributo origen, donde se prefieren los vinos locales, es decir, los de Guanajuato, antes que los producidos en otros estados del país, lo que implica que los encuestados han generado un sentido de identidad, además en esta zona se promocionan intensivamente sus vinos con el enoturismo. El resultado concuerda con lo encontrado con Kallas *et al.* (2012), en su estudio concluyen que el vino local (Catalán) es preferido al vino producido en otras regiones de España. En el mismo sentido Cortiñas *et al.* (2007), determinaron que el origen es de gran importancia a la hora de elegir un producto.

Por último, se encuentra el atributo variedad con su nivel Merlot. Este atributo fue el más importante en el estudio realizado por Cerda *et al.* (2010). De igual manera el atributo variedad fue tomado en cuenta en la investigación realizada por Kallas *et al.* (2012), donde la variedad preferida fue la Cabernet Sauvignon seguida de la Garnacha y Merlot.

Tomando en cuenta lo anterior, la disponibilidad a pagar por un vino producido en Guanajuato, con doce meses de crianza en barricas de madera y de la variedad Merlot, será la sumatoria de las DapMg de cada nivel, dando un total de 750 pesos mexicanos.

CONCLUSIONES

En esta investigación sobre preferencias de los consumidores de vino de Dolores Hidalgo, Guanajuato, México, realizado bajo un enfoque de experimentos de elección, se encontró que los atributos que tienen mayor relevancia en la elección de un vino son el tiempo de crianza en barricas con un porcentaje superior al 50 %, prefiriéndose los vinos con 12 meses de crianza sobre los que pasan solo 6 meses, seguido con un 38 % por el origen (con los niveles nacional y estatal). Por lo tanto, estos dos atributos son los que dirigen el comportamiento de elección de los consumidores de vino. En tercer lugar, se ubica el atributo variedad con el nivel Merlot.

Se concluye que el producto preferido por los consumidores de Dolores Hidalgo, Guanajuato, es un vino guanajuatense, en botella de 750 mL, con una crianza en barricas de madera de doce meses y de la variedad Merlot, por el cual se está dispuesto a pagar un precio de 750 pesos mexicanos.

REFERENCIAS

- Albisu LM, Zeballos MG. 2014. Consumo de vino en España. Tendencias y comportamiento del consumidor. *Economía Cajamar Caja Rural* 14: 99–140.
- Alpizar F, Carlsson F, Martinsson P. 2001. Using choice experiments for non-market valuation. *Working Papers in Economics* 52: 1–37.
- Álvarez-Farizo B, Gil JM, Howard BJ. 2005. Evaluación de impactos ambientales derivados de estrategias de restauración a través de las decisiones de jurados de ciudadanos. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 5 (10): 19–39. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.28787>
- Araya S, Rojas L, Ruiz E. 2020. Importance of packaging in wine preferences: findings in a Chilean wine zone. *Tec Empresarial* 14 (3): 2–15. <https://doi.org/10.18845/te.v14i3.5359>
- Bennett J, Adamowicz W. 2001. Some fundamentals of environmental choice modeling. In *The choice modelling approach to environmental valuation*, Bennett J, Blamey R. (Eds.); Edward Elgar Publishing: Cheltenham, UK, 37–79.
- Bernabeu R, Olmeda M, Díaz M. 2005. Estructura de preferencias de los consumidores de vino y actitudes hacia los vinos con Denominación de Origen. El caso de Castilla-La Mancha. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 5 (9): 57–80. <https://doi.org/10.7201/earn.2005.09.03>

- Cerda A, Torres MJ, García L. 2010. Preferencias y disposición a pagar por vinos ecológicos de parte de los consumidores de la región del Maule, Chile. *Panorama Socioeconómico* 28 (40): 60–70.
- CONAGO (Conferencia Nacional de Gobernadores). 2019. Informe de la comisión de fomento a la industria vitivinícola. https://www.conago.org.mx/reuniones/documentos/2019-04-30/9.2._Informe_CFIV.pdf (Retrieved: January 2020).
- CMV (Consejo Mexicano Vitivinícola). 2020. Consejo Mexicano Vitivinícola. <https://uvayvino.org.mx/index.php> (Retrieved: December 2020).
- Cortiñas M, Chocarro R, Elorz M, Villanueva ML. 2007. La importancia del atributo origen en la elección de productos agroalimentarios. El caso del espárrago de Navarra. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 7 (13): 57–90.
- Espinal NE, Gómez JD. 2011. Experimentos de elección: una metodología para hacer valoración económica de bienes de no mercado. *Ensayos de Economía* 21 (38): 211–242.
- Greene WH. 2003. *Econometric Analysis*. Prentice Hall. New Jersey, USA. 193 p.
- González S. 2015. Cadena de valor económico del vino de Baja California, México. *Estudios Fronterizos* 16 (32): 163–193.
- Henao O, Córdoba JF. 2007. Comportamiento del consumidor, una mirada sociológica. *Enramado* 3 (2): 18–29.
- Holmes T, Adamowicz W. 2003. Attribute-based methods. *In* A primer nonmarket valuation, Champ P, Boyle K, Brown T. (Eds.); Springer: New York, USA, 171–219. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0826-6_6
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021. http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gto/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=11 (Retrieved: March 2021).
- Kallas Z, Escobar C, Gil JM. 2012. Assessing the impact of a Christmas advertisement campaign on Catalan wine preference using choice experiments. *Appetite* 58 (1): 285–298. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2011.09.017>
- Lancaster K. 1966. A new approach to consumer theory. *Journal of Political Economy* 74 (2): 132–157. <https://doi.org/10.1086/259131>
- Lesschaeve I. 2007. Sensory evaluation of wine and commercial realities: Review of current practices and perspectives. *American Journal of Enology and Viticulture* 58: 252–258. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/58/2/252.full.pdf> (Retrieved: July 2021).
- Lockshin L, Jarvis W, d’Hauteville F, Perrouy JP. 2006. Using simulations from discrete choice experiments to measure consumer sensitivity to brand, region, price, and awards in wine choice. *Food Quality and Preference* 17: 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.03.009>
- Lockshin L, Mueller S, Louviere J, Francis L, Osidacz P. 2009. Development of a New Method to Measure How Consumers Choose wine. *The Australian and New Zealand Wine Industry Journal* 24 (2): 37–42.
- Luce D. 1959. *Individual choice behaviour*. Dover Publications: New York, USA. 155 p.
- McFadden D. 1974. Conditional logit analysis of qualitative choice behaviour. *In* *Frontiers in Econometrics*, Zarembka P. (Ed.); Academic Press: New York, USA, 105–142.
- Melo E, Rodríguez R, Martínez MA, Hernández J, Razo R. 2020a. Consideraciones básicas para la aplicación de experimentos de elección discreta: una revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11 (59): 4–30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.676>
- Melo E, Rodríguez R, Martínez MA, Hernández J, Razo R. 2020b. Preferencias sociales para el manejo del Parque Nacional El Chico, mediante experimentos de elección. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11 60: 26–49. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.713>
- Sánchez M, Gil JM. 1997. Análisis de la estructura de preferencias y de las actitudes hacia los vinos tintos con “Denominación de Origen”. *ESIC MARKET* 97: 151–172.
- Secretaría de Turismo del Estado de Guanajuato. 2021. Actividad vinícola en Guanajuato. <https://sectur.guanajuato.gob.mx/#> (Retrieved: July 2021).
- Tait P, Saunders C, Dalziel P, Rutherford P, Driver T, Guenther M. 2019. Estimating wine consumer preferences for sustainability attributes: A discrete choice experiment of Californian Sauvignon blanc purchasers. *Journal of Cleaner Production* 233: 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.076>
- Tudela JW. 2010. Experimentos de elección en la priorización de políticas de gestión en áreas naturales protegidas. *Desarrollo y Sociedad* 66: 183–217.
- Tudela JW, Leos JA. 2017. *Herramientas Metodológicas para Aplicaciones del Experimento de Elección*. Universidad Autónoma Chapingo. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. México. Chapingo, México.



CHARACTERISTICS, ROLES, AND FUNCTIONS OF THE INNOVATION AGENTS IN THE AGRI-FOOD SECTOR

Juan Manuel Vargas-Canales^{1,4}, Sergio Orozco-Cirilo¹, Sergio Ernesto Medina-Cuéllar²,
Joaquín Hutzilihuitl Camacho-Vera^{3*}

¹ Universidad de Guanajuato. Departamento de Estudios Sociales. División de Ciencias Sociales y Administrativas Campus Celaya-Salvatierra. Calle Universidad 600, Col. Janicho, Salvatierra, Guanajuato, México. C. P. 38900.

² Universidad de Guanajuato. Departamento de Arte y Empresa. División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Salamanca-Valle de Santiago, Salamanca, Guanajuato, México. C. P. 36885.

³ Universidad de la Sierra Sur. División de Estudios de Posgrado. Guillermo Rojas Mijangos S/N, Col. Ciudad Universitaria, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, México. C. P. 70800.

⁴ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Socioeconomía, Estadística e Informática-Economía. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, C. P. 56230.

* Corresponding author: camachovera@yahoo.com.mx

ABSTRACT

The importance of innovation in all disciplines and sectors in the current economic dynamic is unquestionable. For several decades, it has been considered as the major force behind the promotion of economic expansion and development. However, the economic models are characterized by their constant change, transformation, and complexity, regarding relationships and interactions, as well as regarding agents and actors involved in such processes. In this regard, the objective of this analysis was to enhance the understanding about the performance of innovation agents and to clearly identify their characteristics, roles, and functions, in order to facilitate the design of strategies that enable the acceleration of the innovations diffusion within the agri-food sector. The definition of agent and its relationship with the territory are discussed as an important element, because the territory is the geographic space in which the innovation process takes place. Regarding the characteristics, roles, and functions, a summary about the identified innovation agents is carried out, along with an analysis of how their interactions enable innovation. Consequently, a characterization of the agents that develop, use, manage, and diffuse innovation allows the integration of clearer and more appropriate studies on the innovation processes that are being developed in the agri-food sector.

Keywords: innovation diffusion, innovation systems, innovation networks, rural territories.

Citation: Vargas-Canales JM, Orozco-Cirilo S, Medina-Cuéllar SE, Camacho-Vera JH. 2022. Characteristics, roles, and functions of the innovation agents in the agri-food sector. *Agrociencia* <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2781>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: September 17, 2021.
Approved: March 23, 2022.
Estimated publication date:
April 26, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 383-404.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



INTRODUCTION

The importance of innovation in the current economic dynamic is unquestionable, considering that it is the driving force behind transformation, growth, and economic development. Therefore, without innovation development, the current economic model would enter a stage that could be described as stagnant. Consequently, the

innovation and the agents that take part in its development and diffusion have been studied in a wide range of disciplines, including sociology, economy, marketing, ecology, and computing (Zhang and Vorobeychik, 2019).

Regarding the analysis of adoption and innovation diffusion within the agri-food sector, there are two great traditions, which have been quite disconnected from one another (Monge and Hartwich, 2008). The sociological tradition about diffusing innovation is similar to a pandemic contagion process, due to the decision taken by the adopting agent (certain producer or company) leads to a subsequent adoption by others who are in touch with or are directly or indirectly influenced by the first producer or company. This process has a slow beginning until a certain number of adopters is reached; this number accelerates the decision-making process of the remaining neighbours. This process takes place mainly through the interaction between the actors, while the efforts of the external agents have an impact on the decision-making process of a minority of producers (pioneers and innovators), who are more receptive to external novelties (Rogers, 1995).

An individualist style tradition rose among the agronomic economists, according to which the agents make the decision to adopt an innovation, based on the profit that they could obtain from the implementation of the said innovation in their production systems. Consequently, each actor reasonably analyses the costs and expected benefits before making a decision, since there is a huge heterogeneity in the individual characteristics and limitations pertaining each producer, consequently a similar dispersion in their decision-making process is to be expected (Griliches, 1957). This tradition dominated the study of agricultural innovation, providing a theoretical and empirical support to many policies, programs, and systems that were implemented in some countries, promoting a technological change among the producers and in the overall agricultural development (Monge and Hartwich, 2008).

The traditional literature about the diffusion of innovation has been dominated by the abovementioned behaviour and aggregated trend models. However, the paradigm of a model based on agent interaction is gaining popularity, because it captures the agents' heterogeneity and enables the detailed modelling of the interactions, which are connected by the networks in the territories (Zhang and Vorobeychik, 2019). In this regard, the networks function as a tool for diffusing innovation among the different agents. Additionally, they represent a complementary response to tackle the changes resulting from the development and the use of technology. Consequently, linking these actors with other agents, in order to share knowledge and to benefit from these interactions, is currently very important (Bullinger *et al.*, 2004). Therefore, the analysis of the benefits obtained from the use of technology is not antagonistic with the interaction model and, they are currently complementary.

The model based in the innovation agents analysis offers two advantages for the study of the innovation diffusion: first, it facilitates the modelling of the heterogeneity of the agent and, second, it allows a detailed modelling of the interactions that shape the innovation networks (Zhang and Vorobeychik, 2019). Consequently, the potential

deficiencies of the innovation systems can be identified and the management schemes can be suggested; additionally, it provides clarity in the principles that rule the creation, diffusion, and adoption of innovation, as well as in the relationships among the knowledge and information inputs and outputs, which turn into innovation (Eito-Brun, 2020).

Meanwhile, the innovation agents can be found in different sectors of the value chain (production, stock, transformation, commercialization, and promotion). They also involve various and different actors that work at diverse levels (companies, national and local public organizations, civil society associations and organizations, and training and research institutes) (Ferreiro and Sousa, 2019). Additionally, they cooperate and compete in the same territories and in the same markets, which creates very complex innovation systems. Therefore, to a certain extent, they determine the effectivity of all their parts, encourage innovative processes in the same territories, and create a high-level competitiveness (Nosova *et al.*, 2018).

In the agri-food sector, network management can be especially useful and efficient to trigger innovation processes. Agriculture and livestock management comprise a great number of small and medium companies, which produce food at different levels and carry out other functions. Compared with other sectors, the great number and diversity of the agents offer a high potential for the creation of networks, the integration of innovation systems, the boosting of the diffusion and adoption processes of innovation. However, innovation management does not only mean adopting an innovation created by farmers, rather it is a communication and cooperation process between the different innovation agents (farmers, researchers, government, and other interested parties) (Wu and Zhang, 2013).

Bullinger *et al.* (2004) suggest that universities, research centres, providers, clients, and other complementary stakeholders have an important impact in the knowledge and innovation creation process. Additionally, some case studies in developing countries highlight the relationship between network and the innovation capacity of small and medium companies (Biggs and Shah, 2006; Kaminski *et al.*, 2008). The evidence shows that the long-term knowledge base of the companies that do not cooperate and that do not formally or informally exchange data is limited (Monge and Hartwich, 2008). At an institutional level, innovation systems play a key role in innovation management (Pittaway *et al.*, 2004).

Networks arise, evolve, and reshape as another element of the territories. Together, they are the basic elements that create small local innovation systems, which in turn, connect and interact with other (regional, domestic, and international) systems and bring together different innovation actors. Additionally, if the joint initiatives about innovation management are successfully implemented by the different agents, the innovation groups collaborate to such a level, that it enables the creation of a unique network effect of innovative synergies, which guarantees a constant growth, a sustainable association of interrelated economic entities, and new opportunities through cooperation (Nosova *et al.*, 2018).

In the case of the agri-food sector, the shaping of the innovation systems is not clear. This situation is potentially the result of the heterogeneity of the activities, the regional asymmetry, and scant links between the actors.

Meanwhile, few research that enable the identification of the impact of the different innovation agents in the sector have been developed. Agricultural extension programs have not been widely successful regarding technology diffusion and linking all the innovation agents. Finally, during the last years, participation has decreased. However, in some agri-food activities, especially those closely linked to international markets, the interactions between the innovation agents are increasingly visible and important, for example, in the production of berries (strawberry, raspberry, blackberry, and blueberry), avocado, tomato, lemon, and mango, among others. In addition, some efforts are being made to identify the impact that the innovation agents have in the productive sector (as an example, protected agriculture) (Vargas-Canales *et al.*, 2022). As an example, the market is currently a relevant actor that must be considered as another agent; in some cases, it might be considered the most important agent, because the users and beneficiaries demand constant improvements. In this regard, the use of platforms and open innovation (Eito-Brun, 2020) have also become one of the main agents related to the integration, management, and diffusion of innovation at all levels and in all sectors. Consequently, the objective of this analysis was to deepen the understanding about the performance of innovation agents and to clearly identify their characteristics, roles, and functions, in order to facilitate the design of strategies, which accelerate the diffusion of innovation in the agri-food sector. The structure of this essay comprises a discussion about the definition of innovation agents and their relationship with the territory. Subsequently, a characterization of the main agents of the agri-food sector is developed. Finally, some conclusions are posed about the objectives and their implications.

INNOVATION AGENTS AND THEIR TERRITORIES

There are multiple definitions about what an agent is, mainly as a result of the great diversity and heterogeneity involved in the roles and functions they perform (Tweedale *et al.*, 2007). Currently, the economic and social dynamic has impacted all sectors and actors involved. Economic activities have diversified, and at the same time, they have become hyper specialized, creating very complex economic systems for the interaction between heterogenous, diverse, and even multi-faceted agents. This situation leads to the question: what is an innovation agent? Trying to simplify a definition that provides a better understanding, analysis, classification, and operation, an innovation agent is an actor that has learning, coordination, and autonomous capacities (Tweedale *et al.*, 2007). These are the minimum characteristics required to create development, management, and innovation diffusion.

Additionally, an analysis of the geographic space where the whole innovation process takes place is required. Therefore, carrying out all these very complex processes requires an environment that favours their creation. In this regard, two key notions have emerged from the systemic analysis process: innovation systems (local, regional,

and domestic) and, more recently, the innovation ecosystems. These notions have become very relevant during the last years. Both require a specific, not clearly delimited environment, which enables the development, interaction, and competition of all innovation agents. According to Pedroza-Zapata and Silva-Flores (2020), in order to trigger development through innovation, these environments must have a strong scientific and technological element, in which universities play a fundamental role.

The territory is a space and, at the same time, a way in which society and relationships are built; it also brings together a set of heterogeneous elements with diverse history, culture, and traditions. Their interaction keeps a constant flow of information; this dynamic allows them to evolve and transform (Vargas-Canales *et al.*, 2018). The territorial approach must be taken into consideration, because it helps to understand the interaction and cooperation mechanisms between the different agents, encouraging the knowledge flows required to create innovation and competitiveness (Oliveira and Turčínková, 2019). Additionally, Ferreira and Sousa (2019) mentioned that the academy lacks a deep knowledge about the innovation processes in the agri-food sector or about more traditional activities in rural territories. Therefore, a new conceptualization about the theoretical and methodology frameworks is required to research and to seek to understand the innovation phenomenon. Additionally, an indicator system that helps the researchers to characterize innovation in rural contexts with greater clarity must be developed.

From the point of view of the theory of evolution, each territory or environment is characterized by the interaction between the different organisms, populations, and communities, as well as by the impact of external factors (Arango-Londoño, 2012). Consequently, the interaction of internal and external factors forces the territories to develop adaptation and innovation mechanisms. Additionally, the territory should be thought of as a global entity that, nevertheless, keeps local characteristics. Regarding the networks and the interactions between the various agents, Arellano and Ortega (2005) mention that a network is an interested connection, linked to a process, which breaks with the idea about distance and proximity and allows researchers to discuss the associations and connections of the actors at all levels.

Consequently, agents with different types of influence can be identified. Undoubtedly, the most important element to manage innovation are local agents. The communities of practice (those who create, adopt, adapt, and spread knowledge, technologies, information, and practices) are located in this local dimension and it is there where the interaction between the rest of the agents takes place. In this regard, there are local and regional agents that can be classified as internal and domestic, and international agents who, as a result of their location, can be classified as external agents (Figure 1). We should highlight that each agent performs crucial functions in the development of the innovation process. Agents which are increasingly important and relevant, and who have a high influence in the innovation systems can be identified. For example, at an international level, external agents linked with the raw material (seeds and fertilizers) supply link are increasingly important, because nowadays value chains

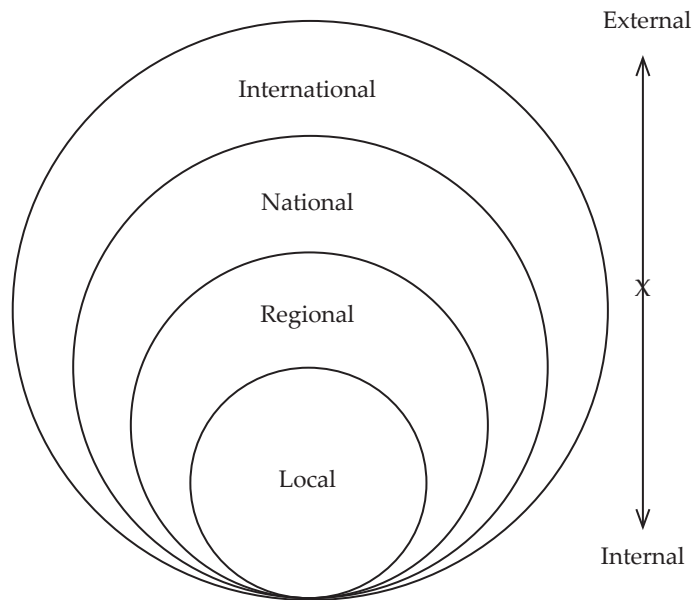


Figure 1. Level of influence of the actors that take part in the innovation processes of the agri-food sector.

are practically global. In this regard, international markets (final consumers) are the agents that determine what is produced, how it is produced, and when it is produced. Universities are major domestic innovation agents, because they are the places where science, technology, and knowledge is developed. These elements will be ultimately transformed into innovation at a local level.

In addition, as a result of the evolutionary process, new entities or agents appear and perform new functions and roles. This quality enables the development of agri-food systems because new agents are required to perform or develop new specific functions and activities. This situation complicates the understanding of the emergence of innovation in the agri-food sector: a very dynamic process, despite opinions on the contrary.

Therefore, using a non-evolutive analogy, human individuals —their interests, beliefs, values, and behaviour— interact in the territory, along with other non-human devices which perform certain functions, and the physical conditions of the environment (Arango Londoño, 2012). Consequently, non-human agents, which are increasingly important and have more influence in our societies, must be considered. Other authors have attempted to explain this situation; such is the case of the actor-network theory of Latour (2005), the theories of quasi-object and quasi-subject of Serres (1980), and the symmetry principle of Bloor (1991).

From the point of view of technological determinism, technology defines social changes; from the point of view of social determinism, technology is just a social construction,

incapable of autonomy or change. In this case, the actor-network theory breaks with that dichotomy and considers technology as the result of a socio-technological framework. Consequently, the interaction between multiple agents, processes, and devices, among others, is required to enable the development of any technology. Therefore, technology is the agent that shapes that social framework, and that (human, non-human) hybridization determines the paths that must be followed. This situation takes place because the technological devices start to have other meanings, to be able to link other actors, to have a certain degree of autonomy, and to be able to reshape themselves and acquire a new meaning. Given the current conditions that indicate that we are heading to agriculture 4.0 and 5.0 —which include artificial intelligence, automatic or autonomous learning, and real time solutions—, this type of approach is increasingly important, because it allows a more reticulated analysis development about the new arrangements that take place between science, technology, and society.

CHARACTERIZATION OF THE INNOVATION AGENTS

Consequently, following different authors who have researched the agents in charge of the development, management, and diffusion of innovation in the agri-food sector, a classification of those agents is summarized (Table 1). Each agent performs specific roles, in some cases, more than one. The different agents are described below:

Communities of practice: this type of actors are groups of producers or companies that develop an activity in the agri-food sector. This type of agent plays different functions including creation, adoption, adaptation, and diffusion of knowledge, technology, and innovation, that gradually shape the territory. This is the result of the dynamic

Table 1. Agents and actors that use, develop, manage, and diffuse innovation.

Agents		Actors	
Communities of practice	Rural companies	Social organizations	Society
Intermediaries	Non-governmental organizations	Public institutions	Public policy and regulatory framework developers
Coordinators and/or linkers	Agricultural extension	Specialized services providers	Specialized raw material providers
Generators of science, technology, and innovation	Universities	Research centres	Tech development companies
Technology diffusion	Technology demonstration modules	Technology diffusion centres	Innovation platforms
Enablers	Financial, credit, and savings companies	Standard-setting organisms (certification and accreditation bodies...)	Training organisms
Complementary stakeholders	Companies related to the chain value (commercialization, stockpiling, and logistics and transport companies)		
Market		Consumers	Competitors

Sources: Bullinger *et al.* (2004); Carlsson and y Stankiewicz (1991); Carlsson *et al.* (2002); García-Sánchez *et al.* (2019); Grovermann *et al.* (2019); Hermans *et al.* (2019); Kamara *et al.* (2019); Maggioni and Uberti (2009); Minh (2019); Vargas-Canales *et al.* (2018); Vargas-Canales *et al.* (2022).

interaction between the method of production, the social and political relationships, and the symbolic constructions, which shape the power and domination relations in their different forms (Lefebvre, 1991). Therefore, these agents develop economic activities (producers, companies, organizations of producers) and share regulations and interests.

Intermediaries: these agents serve as liaisons, facilitating some innovative activity, between two or more parts. Therefore, they establish connections or build bridges between the technology generators and the users of the said technology. Consequently, they perform different functions in order to introduce new products, processes, and organizational or commercial methods into the market (Pérez Hernández, 2016). Additionally, they implement public policies related to the activity and apply the regulatory framework to provide greater certainty to the rest of the agents.

Coordinators or linkers: the main role of these actors is to connect all the existing actors in the territory. They promote collaboration between actors and spread knowledge, practices, and information. Additionally, they arrange the harmonization of processes and facilitate the adoption and adaptation of new technologies. However, the main function of these agents is to provide technical support in the development of projects, for example, agricultural extension (Klerkx and Leeuwis, 2009).

Science, technology, and innovation generators: the main role of these agents is to generate and adapt knowledge and technologies, as well as to carry out experiments to develop products, processes, marketing methods, and forms of organization (Ruiz Castañeda *et al.*, 2016). Consequently, these agents are the scientific and technological base focused in solving social problems.

Technology diffusers: nowadays, these actors are starting to play a major role in almost all the economic sectors. They can validate technologies *in situ* and make the knowledge generated available to almost any user who is interested in them. Consequently, these agents are expected to become main agents related to integration, management, and diffusion of innovation in all levels and sectors (Eito-Brun, 2020).

Enablers: these actors provide the resources required for the development and implementation of the innovations, and they also assess their capacity to adapt to the requirements of the market and their proper operation. Therefore, these actors promote competition and contribute to reduce the entry barriers of the markets. In addition, they function as a fundamental enabler to the territories; consequently, the education, training, and human resources capacities are considered as key factors to activate the innovation processes.

Complementary stakeholders: through their interventions and actions, these agents enhance the appreciation that clients have for the goods and services of the companies. Overall, they provide intangible elements and do not physically take part of the final product. In the agri-food sector, these agents perform essential functions: they develop the infrastructure required to integrate the value chain. Additionally, they develop and link new markets and take part in several activities throughout the value chain (Vargas-Canales *et al.*, 2022).

Market: the role of this agent in any productive system is fundamental. The market compels the agents and all the links of the value chain to keep a constant competition, and this stimulates the development of innovation in the long term. Consequently, the agents become more competitive and comply with the regulations in force; above all, they adapt their product according to the taste, preferences, and wishes of the consumers (Geels and Schot, 2007; Vargas-Canales *et al.*, 2018). Through the taste and preferences of the consumers, the market determines the type, characteristics, and ways of distribution of the products, among others. For example, there have been changes in the demand for agri-food products derived from the COVID-19 (SARS-CoV-2) pandemic; consequently, the demand is changing to innocuous, organic products, with high-antioxidant, aminoacids, and mineral content.

Based on this information, this analysis about the innovation agents in the agri-food sector come close to the proposals of Vargas-Canales *et al.* (2022). They mention that an innovation system in the agri-food sector is made up of universities, institutions, organizations, and companies, which interact through networks, knowledge exchange, information, practices, and experiences about a technology in a specific activity and that it also includes all the operations and transactions aimed at satisfying food demand. This includes all the agents linked to the value chain; this is, the actors related to the raw materials supply, primary production, storage, processing, transformation, logistics, distribution, and commercialization.

CONCLUSIONS

Current literature on innovation diffusion has been dominated by the paradigm of the model based on the interaction of the agents, with some elements of other currents, because it encompasses the heterogeneity of the agents and allows researchers to develop the detailed modelling of the interactions through territory networks.

Overall, despite the existing diversity, the main functions, and roles of the innovation agents in the agri-food sector can be clearly identified. It should be mentioned that these are heterogeneous, diverse, and even multi-faceted agents.

Establishing a clear characterization of the agents that develop, use, manage, and diffuse innovations enables the integration of clearer and more appropriate research about the innovation processes developed in the agri-food sector. Additionally, identifying the mechanisms and strategies that accelerate the diffusion of innovation in the agri-food sector is likewise important.

REFERENCES

- Arango Londoño JF. 2012. La gestión de la innovación como la gestión de un ecosistema heterogéneo y estructurado. Cuadernos de Gestión, 12, 125–137. <https://doi.org/10.5295/cdg.110305ja>
- Arellano HA, Ortega PC. 2005. Las Redes Sociotécnicas en Torno a la Investigación Biotecnológica del Maíz. Convergencia Revista de Ciencias Sociales 38, 255–276.
- Biggs T, Shah MK. 2006. African SMES, networks, and manufacturing performance. Journal of Banking and Finance, 30(11): 3043–3066. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2006.05.004>
- Bloor D. 1991. Knowledge and Social Imagery. University of Chicago Press. 2nd Edition. Chicago, IL, USA.

- Bullinger H-J, Auernhammer K, Gomeringer A. 2004. Managing innovation networks in the knowledge-driven economy. *International Journal of Production Research*, 42(17): 3337–3353. <https://doi.org/10.1080/00207540410001695970>
- Carlsson B, Stankiewicz R. 1991. On the nature, function and composition of technological systems. *Journal of Evolutionary Economics*, 1(2): 93–118. <https://doi.org/10.1007/BF01224915>
- Carlsson, Bo, Jacobsson S, Holmén M, Rickne A. 2002. Innovation systems: analytical and methodological issues. *Research Policy*, 31: 233–245. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00138-X)
- Eito-Brun R. 2020. Synergies Between Web-Based Open Innovation Platforms and Open Information Infrastructures pp: 254–261. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30443-0_23
- Ferreiro M, Sousa C. 2019. Governance, institutions and innovation in rural territories: The case of Coruche innovation network. *Regional Science Policy & Practice*, 11(2): 235–250. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12147>
- García-Sánchez EI, Vargas-Canales JM, Palacios-Rangel MI, Aguilar-Ávila J. 2018. Sistema de innovación como marco analítico de la agricultura protegida en la región centro de México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(81): 1–24. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr15-81.sima>
- Geels FW, Schot J. 2007. Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3): 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Griliches Z. 1957. Hybrid corn: An exploration in the economics of technological change. *Econometrica*, 25(4): 501–522.
- Grovermann C, Wossen T, Muller A, Nichterlein K. 2019. Eco-efficiency and agricultural innovation systems in developing countries: Evidence from macro-level analysis. *PLoS ONE* 14(4): 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214115>
- Hermans F, Geerling-Eiff F, Potters J, Klerkx L. 2019. Public-private partnerships as systemic agricultural innovation policy instruments – Assessing their contribution to innovation system function dynamics. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 88(October 2018) pp: 76–95. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2018.10.001>
- Kamara LI, Dorward P, Lalani B, Wauters E. 2019. Unpacking the drivers behind the use of the Agricultural Innovation Systems (AIS) approach: The case of rice research and extension professionals in Sierra Leone. *Agricultural Systems*, 176(August), 102673. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102673>
- Kaminski PC, de Oliveira AC, Lopes TM. 2008. Knowledge transfer in product development processes: A case study in small and medium enterprises (SMEs) of the metal-mechanic sector from São Paulo, Brazil. *Technovation* 28(1–2): 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2007.07.001>
- Klerkx L, Leeuwis C. 2009. Establishment and embedding of innovation brokers at different innovation system levels: Insights from the Dutch agricultural sector. *Technological Forecasting and Social Change* 76(6): 849–860. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.10.001>
- Latour B. 2005. *Reassembling the social*. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Lefebvre H. 1991. *The production of place*. Donald Nicholson-Smith. Basil Blackwell. Oxford, UK.
- Maggioni MA, Uberti TE. 2009. Knowledge networks across Europe: Which distance matters? *Annals of Regional Science* 43: 691–720. <https://doi.org/10.1007/s00168-008-0254-7>
- Minh TT. 2019. Unpacking the systemic problems and blocking mechanisms of a regional agricultural innovation system: An integrated regional-functional-structural analysis. *Agricultural Systems* 173(January): 268–280. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.009>
- Monge PM, Hartwich F. 2008. Análisis de Redes Sociales aplicado al estudio de los procesos de innovación agrícola. *REDES-Revista Hispana Para El Análisis de Redes Sociales* 14(2): 1–31. <https://doi.org/978-950-34-0513-0>
- Nosova SS, Makar SV, Chapljuk VZ, Medvedeva AM, Semenova AN. 2018. Collaborative nature of innovative economy. *Espacios* 39(41). <http://www.revistaespacios.com/a18v39n41/a18v39n41p32.pdf> (Retrieved: February 2022).
- Oliveira P, Turčínková J. 2019. Human Capital, Innovation and Internationalization of Micro and Small Enterprises in Rural Territory – a Case Study. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 67(2): 545–563. <https://doi.org/10.11118/actaun201967020545>
- Pedroza-Zapata AR, Silva-Flores ML. 2020. Ecosistema Universitario de Ciencia, Tecnología, Innovación y Emprendimiento. *Magis, Revista Internacional de Investigación en Educación* 12(25): 93–110. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.m12-25.euct>

- Pérez Hernández M del PM. 2016. Las organizaciones intermedias en los procesos de innovación en México. *Perfiles Latinoamericanos* 24(48): 161–183. <https://doi.org/10.18504/pl2448-007-2016>
- Pittaway L, Robertson M, Munir K, Denyer D, Neely A. 2004. Networking and innovation: a systematic review of the evidence. *International Journal of Management Reviews* 5–6(3–4): 137–168. <https://doi.org/10.1111/j.1460-8545.2004.00101.x>
- Rogers EM. 1995. *Diffusion of innovations*. Newyork Free Press. 4th Edition. New York, NY, USA.
- Ruiz Castañeda WL, Quintero Ramírez S, Robledo Velásquez J. 2016. Impacto de los Intermediarios en los Sistemas de Innovación. *Journal of Technology Management & Innovation* 11(2): 130–138. <https://doi.org/10.4067/S0718-27242016000200013>
- Serres M. (1982). *The Parasite*. Lawrence R. Schehr. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, MD, USA:
- Tweedale J, Ichalkaranje N, Sioutis C, Jarvis B, Consoli A, Phillips-Wren G. 2007. Innovations in multi-agent systems. *Journal of Network and Computer Applications* 30(3): 1089–1115. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2006.04.005>
- Vargas-Canales JM, Palacios-Rangel MI, García-Cruz JC, Camacho-Vera JH, Sánchez-Torres Y, Simón-Calderón C. 2022. Analysis of the impact of the regional innovation system of protected agriculture in Hidalgo, Mexico. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, pp: 1-26. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2022.2039246>
- Vargas-Canales JM, Palacios-Rangel MI, Aguilar-Ávila J, Ocampo-Ledesma JG, Kreimer P, Ortiz-Martínez G. 2018. Technological innovation in a case of protected agriculture in Mexico. *Revista de Geografía Agrícola* 61(2): 9–38. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2017.61.02>
- Wu B, Zhang L. 2013. Farmer innovation diffusion via network building: A case of winter greenhouse diffusion in China. *Agriculture and Human Values* 30(4): 641–651. <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9438-6>
- Zhang H, Vorobeychik Y. 2019. Empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: a critical review. *Artificial Intelligence Review* 52(1): 707–741. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9577-z>

CARACTERÍSTICAS, ROLES Y FUNCIONES DE LOS AGENTES DE INNOVACIÓN EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO

Juan Manuel Vargas-Canales^{1,4}, Sergio Orozco-Cirilo¹, Sergio Ernesto Medina-Cuéllar²,
Joaquín Hutzilihuitl Camacho-Vera^{3*}

¹ Universidad de Guanajuato. Departamento de Estudios Sociales. División de Ciencias Sociales y Administrativas Campus Celaya-Salvatierra. Calle Universidad 600, Col. Janicho, Salvatierra, Guanajuato, México. C. P. 38900.

² Universidad de Guanajuato. Departamento de Arte y Empresa. División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Salamanca-Valle de Santiago, Salamanca, Guanajuato, México. C. P. 36885.

³ Universidad de la Sierra Sur. División de Estudios de Posgrado. Guillermo Rojas Mijangos S/N, Col. Ciudad Universitaria, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, México. C. P. 70800.

⁴ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Socioeconomía, Estadística e Informática-Economía. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, C. P. 56230.

* Autor para correspondencia: camachovera@yahoo.com.mx

RESUMEN

La importancia que tiene la innovación en la dinámica económica actual es indiscutible en todas las disciplinas y sectores, debido principalmente a que desde hace varias décadas es considerada la fuerza que promueve la expansión y el desarrollo económico. Sin embargo, una característica de los modelos económicos es su constante cambio, transformación y complejidad tanto de relaciones e interacciones como de agentes y actores que participan en ellos. En ese sentido, el objetivo de este análisis fue profundizar en comprender el actuar de los agentes de la innovación e identificar claramente sus características, roles y funciones con la finalidad de facilitar el diseño de estrategias que permitan dinamizar la difusión de innovaciones en el sector agroalimentario. Se discute como un elemento importante el concepto de agente y su relación con el territorio ya que es el espacio geográfico en donde se gesta todo el proceso de innovación. En cuanto a las características, roles y funciones se realiza una síntesis sobre los agentes de innovación que se han identificado y que interaccionan para hacer posible la innovación. En consecuencia, una caracterización de los agentes que desarrollan, usan, gestionan y difunden innovaciones permite integrar investigaciones más claras y pertinentes sobre los procesos de innovación que se desarrollan en el sector agroalimentario.

Palabras clave: difusión de innovaciones, sistemas de innovación, redes de innovación, territorios rurales.

INTRODUCCIÓN

La importancia de la innovación en la dinámica económica actual es indiscutible al considerarse la fuerza generadora de la transformación, crecimiento y el desarrollo económico. Es decir, sin el desarrollo de innovaciones el modelo económico actual en-

Citation: Vargas-Canales JM, Orozco-Cirilo S, Medina-Cuéllar SE, Camacho-Vera JH. 2022. Characteristics, roles, and functions of the innovation agents in the agri-food sector. *Agrociencia* <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2781>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: September 17, 2021.
Approved: March 23, 2022.
Estimated publication date:
April 26, 2022.

Agrociencia, 56(2).
16 de febrero - 31 de marzo.
2022. pp: 383-404.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



traría en una especie de estancamiento. En consecuencia su estudio y el de los agentes involucrados en su desarrollo y su difusión ha sido objeto de estudio de una amplia variedad de disciplinas, incluyendo la sociología, economía, mercadotecnia, ecología e informática (Zhang y Vorobeychik, 2019).

En lo que respecta al análisis de la adopción y difusión de innovaciones en el sector agroalimentario existen dos grandes tradiciones que han estado bastante inconexas entre sí (Monge y Hartwich, 2008). La tradición sociológica en la que la difusión de innovaciones se asemeja a un proceso de contagio epidémico, en virtud del cual la decisión del agente adoptador (cierto productor o empresa) conlleva a la adopción posterior de otros que están en contacto, o son influidos directa o indirectamente, por aquel. Se trata de un proceso que en su inicio es lento hasta que se logra alcanzar un cierto número de adoptadores capaz de acelerar el proceso decisorio de sus restantes vecinos. El proceso se da básicamente mediante la interacción entre actores, en tanto que los esfuerzos de los agentes externos tienen efecto sobre la toma de decisiones de una minoría de productores, los pioneros e innovadores, quienes son más receptivos a las novedades externas (Rogers, 1995).

Entre especialistas de economía agrícola surgió una tradición de estilo individualista, de acuerdo con la cual los agentes toman la decisión de adoptar con base en las utilidades que podrían obtener de su implementación en sus sistemas de producción. Para ello, cada actor analiza de forma racional los costos y beneficios esperados antes de decidir; y como existe una enorme heterogeneidad en las características individuales y las limitaciones que cada productor enfrenta, es de esperar una dispersión similar en su toma de decisiones (Griliches, 1957). Esta tradición asumió un papel dominante en el estudio de la innovación agrícola, dando respaldo teórico y empírico a muchas de las políticas, programas y sistemas que han tenido lugar en algunos países a fin de promover el cambio tecnológico entre los productores y el desarrollo agrícola en general (Monge y Hartwich, 2008).

La literatura tradicional sobre difusión de la innovación ha estado dominada por los modelos anteriormente mencionados de comportamiento y tendencias agregadas. Sin embargo, el paradigma del modelo basado en la interacción de los agentes está ganando popularidad, ya que captura la heterogeneidad de los agentes y permite el modelado detallado de las interacciones mediadas por redes en los territorios (Zhang y Vorobeychik, 2019). En este sentido, las redes que funcionan como un instrumento para la difusión de las innovaciones entre los diferentes agentes, representan una respuesta complementaria para enfrentar los cambios derivados del desarrollo y del uso de la tecnología. En consecuencia, en la actualidad es considerado de gran importancia vincular a estos actores con otros agentes con la finalidad de compartir conocimientos y beneficiarse de sus interacciones (Bullinger *et al.*, 2004). Es conveniente aclarar que el análisis de los beneficios que se obtienen del uso de la tecnología no es antagónico en el modelo interaccionista y en la actualidad son complementarios.

El modelo basado en el análisis de los agentes de la innovación ofrece dos ventajas para el estudio de la difusión de la innovación: en primer lugar, facilita el modelado

de la heterogeneidad del agente y, en segundo lugar, permite el modelado detallado de las interacciones que configuran las redes de innovación (Zhang y Vorobeychik, 2019). Lo anterior posibilita identificar las posibles deficiencias en los sistemas de innovación y plantear esquemas de gestión, además, da claridad sobre las reglas que rigen la generación, difusión y adopción de la innovación, y las relaciones entre las entradas y salidas de conocimiento e información que se transforman en innovación (Eito-Brun, 2020).

Por otra parte, es pertinente aclarar que los agente de la innovación se encuentran en los distintos segmentos de la cadena de valor (producción, acopio, transformación, comercialización, promoción), e involucra a varios y diferentes actores que operan a diversas escalas (empresas, organizaciones públicas nacionales y locales, asociaciones y organizaciones de la sociedad civil, instituciones de enseñanza e investigación) (Ferreiro y Sousa, 2019). Además, cooperan y compiten en los mismos territorios y en los mismos mercados, lo que configura sistemas de innovación muy complejos. Lo anterior, de cierta forma determinan la efectividad de todos sus componentes, se estimulan procesos innovadores dentro del mismo territorio y se genera un alto nivel de competitividad (Nosova *et al.*, 2018).

En el sector agroalimentario la gestión de redes puede ser especialmente útil y eficaz para detonar procesos de innovación. La agricultura y la ganadería está compuesta por un gran número de pequeñas y medianas empresas que se dedican a la producción de alimentos de distintas formas, además de desempeñar otras funciones. El gran número y diversidad de agentes ofrecen mayor posibilidad de formar redes, integrar sistemas de innovación y dinamizar los procesos de difusión y adopción de innovaciones en comparación a otros sectores. Sin embargo, la gestión de la innovación no es simplemente la adopción de una innovación hecha por los agricultores, sino un proceso de comunicación y cooperación entre los distintos agentes de la innovación (agricultores, investigadores, el gobiernos y otras partes interesadas) (Wu y Zhang, 2013). Bullinger *et al.* (2004) sugieren que las universidades, los centros de investigación, los proveedores, los clientes y otros complementadores tienen un impacto importante en el proceso de creación de conocimiento e innovación. También, algunos estudios de caso en los países en desarrollo ponen de relieve las relaciones entre la red y la capacidad de innovación de las pequeñas y medianas empresas (Biggs y Shah, 2006; Kaminski *et al.*, 2008). La evidencia muestra que las empresas que no cooperan y que no intercambian formal o informalmente información limitan su base de conocimientos a largo plazo (Monge y Hartwich, 2008). Y a nivel institucional, los sistemas de innovación desempeñan un papel fundamental en la gestión de la innovación (Pittaway *et al.*, 2004).

Las redes que surgen, evolucionan y se reconfiguran como un componente más de los territorios, son los elementos básicos que en conjunto van gestando pequeños sistemas locales de innovación que a su vez se conectan e interactúan con otros sistemas (regionales, nacionales e internacionales) y son quienes articulan los distintos agentes de la innovación. Así mismo, si las iniciativas conjuntas de los distintos agentes sobre

gestión de la innovación se implementan con éxito, los grupos innovadores desarrollan la colaboración a un nivel en el que surge un efecto de red único de sinergias innovadoras que garantiza un crecimiento continuo de la productividad, una asociación sostenible de entidades económicas interrelacionadas y nuevas oportunidades a través de la cooperación (Nosova *et al.*, 2018).

En el caso del sector agroalimentario la configuración de los sistemas de innovación no es clara. Situación que es posible se deba a la heterogeneidad de actividades, las asimetrías regionales y a la poca vinculación entre los distintos actores. Por otro lado, se han desarrollado pocas investigaciones que permitan identificar el impacto de los distintos agentes de innovación en el sector, los programas de extensionismo no han tenido el suficiente éxito en transferir tecnología y vincular a todos los agentes de la innovación y en los últimos años se ha reducido mucho su participación. Sin embargo, en algunas actividades agroalimentarias, sobre todo las más vinculadas a los mercados internacionales, cada vez son más visibles e importantes las interacciones de los agentes de la innovación como es el caso de los sistemas de producción de frutillas (fresa, frambuesa, zarzamora y arándano), aguacate, jitomate, limón, mango, entre otros. Además, hay algunos esfuerzos en identificar los impactos que tienen los agentes de innovación en el sector productivo como lo es el caso de la agricultura protegida (Vargas-Canales *et al.*, 2022).

En la actualidad, por ejemplo, un actor relevante que se debe considerar es el mercado, como un agente más y en algunos casos quizás el más importante, debido a que son los usuarios y beneficiarios quienes están demandando mejoras continuas. En ese mismo sentido, el uso de plataformas y la innovación abierta (Eito-Brun, 2020), se han convertido también en unos de los principales agentes relacionados con la integración, gestión y difusión de la innovación a todos los niveles y en todos los sectores. Derivado de lo anterior el objetivo de este análisis fue profundizar en comprender el actuar de los agentes de la innovación e identificar claramente sus características, roles y funciones con la finalidad de facilitar el diseño de estrategias que permitan dinamizar la difusión de innovaciones en el sector agroalimentario. La estructura de este ensayo consta de una discusión sobre la conceptualización de los agentes de la innovación y su relación con el territorio. Posteriormente se desarrolla una caracterización de los principales agentes que se han identificado en el sector agroalimentario. Y al final se plantean algunas conclusiones relacionadas con los objetivos y sus implicaciones.

AGENTES DE INNOVACIÓN Y TERRITORIO

Existen múltiples definiciones de lo que es un agente y la principal razón se debe a la gran diversidad y heterogeneidad de los roles y funciones que desempeñan (Tweedale *et al.*, 2007). En la actualidad, la dinámica económica y social ha impactado en todos los sectores y actores involucrados. Las actividades económicas se han diversificado y a la vez hiper-especializado lo que genera sistemas económicos muy complejos donde interactúan agentes heterogéneos, diversos e incluso polifacéticos. Lo anterior, nos obliga a preguntarnos ¿qué es un agente de innovación? En ese sentido, tratando de

simplificar una definición que permita una mejor comprensión, análisis, clasificación y operación se consideró a un agente de innovación como un actor con capacidad de aprendizaje, coordinación y autonomía (Tweedale *et al.*, 2007). Características mínimas necesarias para generar desarrollo, gestión y difusión de innovaciones.

Así mismo, es necesario analizar el espacio geográfico donde todo el proceso de innovación ocurre. Es decir, para que estos procesos que son muy complejos se materialicen se requiere de un entorno propicio para su gestación. En ese sentido han surgido desde la corriente del análisis sistémico dos conceptos claves que han tomado mucha relevancia en los últimos años, los sistemas de innovación (local, regional y nacional) y más recientemente el concepto de ecosistemas de innovación. En ambos casos se requiere de un entorno concreto, no claramente delimitado, que permita el desenvolvimiento, interacción y competencia de todos los agentes relacionados con la innovación. En donde de acuerdo con Pedroza-Zapata y Silva-Flores (2020), en la actualidad para detonar el desarrollo mediante la innovación en esos ambientes es necesario un fuerte componente científico y tecnológico, donde las universidades tienen un papel fundamental.

El territorio es un espacio y a su vez una forma de construir la sociedad y las relaciones, donde se integra un conjunto de elementos heterogéneos con historia, cultura y tradiciones distintas que interactúan manteniendo un flujo constante de información, dinámica que les permite su evolución y transformación (Vargas-Canales *et al.*, 2018). La importancia de considerar el enfoque territorial es que permite comprender los mecanismos de interacción y cooperación entre los diferentes agentes, que estimulan los flujos de conocimiento necesarios para generar innovación y competitividad (Oliveira y Turčínková, 2019). Además, como lo menciona Ferreira y Sousa (2019), se conoce poco por parte de la academia sobre los procesos de innovación en el sector agroalimentario y/o en actividades de tipo más tradicional que se desarrollan en territorios rurales. Por lo cual coincidiendo con los autores antes mencionados es necesaria una re conceptualización sobre el marco teórico y metodológico para realizar investigación y tratar de comprender el fenómeno de la innovación y de ser posible desarrollar un sistema de indicadores que nos ayuden a caracterizar de forma más clara la innovación en contextos rurales.

Desde la perspectiva de la teoría evolucionista cada territorio o entorno está caracterizado por las interacciones de los diferentes organismos, poblaciones y comunidades, y los factores externos que los afectan (Arango Londoño, 2012). Es decir, existe la interacción de los factores internos y de los factores externos que son los que obligan al territorio a desarrollar mecanismos de adaptación e innovación. Así mismo, es necesario pensar al territorio como una entidad global que no obstante permanece local. Coincidiendo con lo que plantea Arellano y Ortega (2005), respecto a las redes e interacciones que se generan entre los distintos agentes, una red es una conexión interesada y vinculada a un proceso, lo que rompe con la idea de distancia y de proximidad, y permite aludir a las asociaciones y conexiones de los actores a todos los niveles.

Derivado de lo anterior es posible identificar agentes que tienen distintos tipos de influencia. Sin duda lo más relevante para gestionar la innovación es el agente que

se ubica en la dimensión local. Por qué es ahí donde se encuentra las comunidades de práctica (quienes crean, adoptan, adaptan y difunden conocimientos, tecnologías, información y prácticas) y es ahí donde se da la interacción del resto de agentes. En ese sentido, encontramos agentes locales y regionales que podemos catalogarlos como internos y nacionales e internacionales que por su ubicación podemos identificarlos como externos (Figura 1).

Es conveniente aclarar que cada uno de ellos cumple con funciones cruciales para el desarrollo del proceso de innovación. Es posible identificar agentes de innovación que cada vez son más importante, relevantes e influyen mucho en los sistemas de innovación. A nivel internacional, por ejemplo, los agentes externos vinculados con el eslabón de la proveeduría de insumos como las semillas y fertilizantes cada vez son más importantes porque en la actualidad las cadenas de valor prácticamente son globales. En ese mismo sentido, los mercados internacionales (consumidores finales) son los agentes que están determinando qué, cómo y cuándo producir. A nivel nacional podemos identificar como agentes de la innovación importantes a las Universidades, que es donde se está desarrollando la ciencia, tecnología y/o conocimiento que finalmente se transformará en innovación a nivel local.

Además, y como efecto del proceso evolutivo se da la emergencia de nuevas entidades o agentes que van cumpliendo con nuevas funciones y roles. Es una propiedad que permite el desenvolvimiento de los sistemas agroalimentarios, debido a que se requiere de nuevos agentes que cumplan o desarrollen nuevas funciones y actividades específicas. Lo que complejiza aún más la comprensión del surgimiento de la innovación

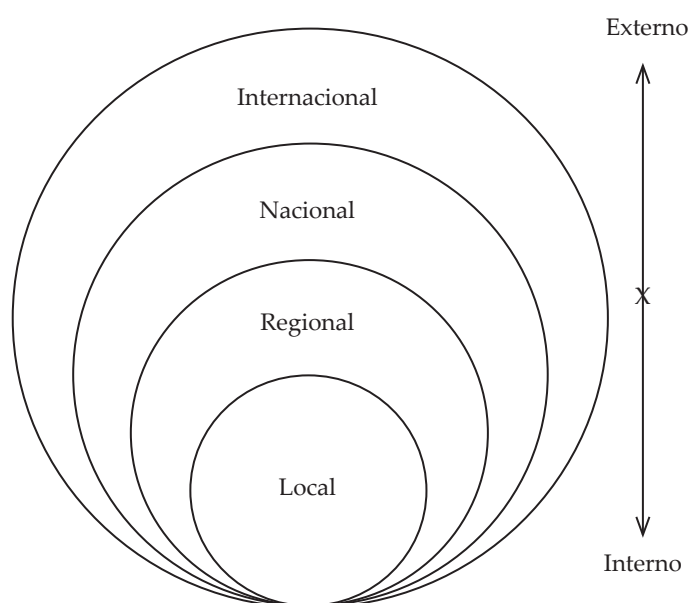


Figura 1. Nivel de influencia de los actores presentes en los procesos de innovación en el sector agroalimentario.

en el sector agroalimentario que es un proceso muy dinámico pese a que se pudiese pensar lo contrario.

Así, en una analogía neo evolutiva para la innovación, en el territorio interaccionan individuos humanos, sus intereses, creencias y valores, su comportamiento, y también los dispositivos no humanos que están cumpliendo ciertas funciones, al igual que las condiciones físicas del entorno (Arango Londoño, 2012). En ese sentido, es necesario pensar en los agentes no humanos que cada vez son más importantes y tienen más influencia en nuestra sociedad. Al respecto algunos autores han tratado de explicar lo anterior como el caso de la Teoría del Actor Red de Latour (2005), el concepto de cuasi-objeto y cuasi-sujeto de Serres (1980) y el principio de simetría generalizada de Bloor (1991).

Es conveniente mencionar que, desde el determinismo tecnológico, la tecnología define los cambios sociales y desde el determinismo social, la tecnología es solo una construcción social sin capacidad de autonomía ni de generar cambios. En este caso la Teoría del Actor Red rompe con esa dicotomía y considera la tecnología como el resultado de un entramado sociotécnico. Es decir, para el desarrollo de cualquier tecnología se requiere la interacción de múltiples agentes, procesos, artefactos, entre otros que son quienes posibilitan su desarrollo. Es decir, la tecnología es el agente quien configura ese entramado social y en esa hibridación (humano, no humano) van determinando el rumbo de las trayectorias que se deben seguir. Lo anterior debido a que los artefactos tecnológicos empiezan a tener otros significados, capacidad de vincular a otros actores, cierta autonomía y son capaces de reconfigurarse y resignificarse. En la actualidad, dadas las condiciones presentes que indican que estamos transitando hacia la agricultura 4.0 y 5.0 (incluye la inteligencia artificial, el aprendizaje automático o autónomo y las soluciones en tiempo real), este tipo de planteamientos cada vez son más importantes debido a que permiten desarrollar un análisis más reticular sobre los nuevos ensamblajes que se están dando entre la ciencia, la tecnología y la sociedad.

CARACTERIZACIÓN DE LOS AGENTES DE INNOVACIÓN

Partiendo de lo anterior y considerando a distintos autores que han trabajado en relación con los agentes encargados del desarrollo, gestión y difusión de la innovación en el sector agroalimentario se presentan una clasificación en el Cuadro 1. Es importante señalar que cada agente cumple con roles específicos, en algunos casos más de uno, y a continuación se describen:

Comunidades de práctica: este tipo de actores son los grupos de productores o empresas que desarrollan alguna actividad en el sector agroalimentario. Este tipo de agentes realiza distintas funciones, entre las que destacan generar, adoptar, adaptar y difundir conocimiento, tecnología e innovación y paulatinamente van configuran el territorio. Lo anterior, como fruto de la interacción dinámica entre el modo de producción, las relaciones sociales y políticas y las construcciones simbólicas, lo cual configura las relaciones de poder y dominación en sus diferentes formas (Lefebvre, 1991). Es decir, se trata de los agentes que desarrollan las actividades económicas (productores, empresas, organizaciones de productores) y comparten normas e intereses.

Cuadro 1. Agentes y actores relacionados con el uso, desarrollo, gestión y difusión de la innovación.

Agentes		Actores	
Comunidades de práctica	Empresas rurales	Organizaciones Sociales	Diseñadores de políticas públicas y marcos regulatorios
Intermediarios	Organizaciones No Gubernamentales	Instituciones públicas	Proveedores de insumos especializados
Articuladores y/o vinculadores	Extensionismo	Proveedores de servicios especializados	Empresas que desarrollan tecnología
Generadores de Ciencia, Tecnología e Innovación	Universidades	Centros de investigación	Plataformas de innovación
Transferencia de Tecnología	Módulos de demostración tecnológica	Centros de transferencia de tecnología	Organismos capacitadores
Habilitadores	Instituciones financiadoras, crediticias y de ahorro	Organismos normalizadores (certificadoras, acreditadoras...)	Training organisms
Complementadores	Empresas relacionadas con la cadena de valor (comercializadoras, acopiadoras, transformadoras, de logística y transporte)		
Mercado		Consumidores	Competidores

Fuentes: Bullinger *et al.*, (2004); Carlsson y Stankiewicz (1991); Carlsson *et al.*, (2002); García-Sánchez *et al.*, (2019); Grovermann *et al.*, (2019); Hermans *et al.*, (2019); Kamara *et al.*, (2019); Maggioni y Uberti (2009); Minh (2019); Vargas-Canales *et al.*, (2018); Vargas-Canales *et al.*, (2022).

Intermediarios: son agentes que funcionan como enlaces que facilitan alguna actividad innovadora entre dos o más partes. Es decir, sirven de conexión o puente entre los generadores de tecnología y los usuarios de la misma, para lo cual asumen una diversidad de funciones con el propósito de introducir al mercado nuevos productos, procesos y métodos organizacionales o comerciales (Pérez Hernández, 2016). Además, se encargan de implementar las políticas públicas relacionadas con la actividad y se encargan de aplicar el marco regulatorio con la finalidad de dar mayor certidumbre a el resto de los agentes.

Articuladores o vinculadores: el rol principal de estos actores es conectar a todos los actores existentes en el territorio. Se encargan de fomentar la colaboración entre actores y difundir conocimiento, prácticas e información. Además, se encargan de armonizar los procesos y facilitar la adopción y adaptación de las nuevas tecnologías. Pero la función más importante que realizan es el acompañamiento técnico en el desarrollo de los proyectos como lo es el caso del extensionismo (Klerkx y Leeuwis, 2009).

Generadores de Ciencia, Tecnología e Innovación: los principales roles de estos agentes son generar y adaptar conocimiento y tecnologías y desarrollar experimentalmente productos, procesos, métodos de mercadeo y formas de organización (Ruiz Castañeda *et al.*, 2016). Es decir, se trata de la base científica y tecnológica enfocada a resolver la problemática social.

Transferidores de tecnología: en la actualidad estos actores están empezando a jugar un rol muy importante en casi todos los sectores económicos. Lo anterior, debido a

que mediante ellos es posible validar tecnologías *in situ* y poner a disposición casi de cualquier usuario el conocimiento generado sobre los temas de su interés. De ahí que se espere que a futuro sean los principales agentes relacionados con la integración, gestión y difusión de la innovación a todos los niveles y en todos los sectores (Eito-Brun, 2020).

Habilitadores: estos actores son los encargados de proveer los recursos necesarios para el desarrollo e implementación de las innovaciones. Así como la de valorar su capacidad de adaptarse a los requerimientos del mercado y de su correcto funcionamiento. Por lo tanto, estos actores fomentan la competencia y coadyuvan a disminuir las barreras de entrada a los mercados. Además, como un habilitador fundamental para lo territorios aquí se considera la formación, capacitación y habilidades de los recursos humanos como un factor clave para la activación de los procesos de innovación.

Complementadores: a través de sus intervenciones o acciones hacen que los clientes valoren más los bienes y servicios de las empresas; por lo general éstos aportan elementos intangibles y no forman físicamente parte del producto final. En las actividades del sector agroalimentario estos actores desempeñan funciones esenciales debido a que desarrollan la infraestructura necesaria para la integración de las cadenas de valor. Además, se encargan de desarrollar y vincular nuevos mercados y se relacionan con diversas actividades a lo largo de toda la cadena de valor (Vargas-Canales *et al.*, 2022).

Mercado: el rol que desempeña el mercado en cualquier sistema productivo es fundamental. El mercado obliga al resto de los agentes y a todos los eslabones de la cadena de valor a mantener una competencia constante y en el largo plazo eso estimula el desarrollo de innovaciones. Lo anterior con la finalidad de ser más competitivos, cumplir con la normatividad vigente, pero sobre todo adaptar su producto de acuerdo con los gustos, preferencias y deseos de los consumidores (Geels y Schot, 2007; Vargas-Canales *et al.*, 2018). El mercado a través de los gustos y preferencias de los consumidores determina el tipo de productos, las características, las formas de distribución, entre otras actividades. Un ejemplo de ello son los cambios en la demanda de productos agroalimentarios derivados de la pandemia emitida por el COVID-19 (SARS-CoV-2), es decir, la demanda se está orientando a productos inocuos, orgánicos, con altos contenidos de antioxidantes, aminoácidos y minerales.

De acuerdo con lo anterior, este análisis sobre los agentes de innovación en el sector agroalimentario se aproxima a lo planteado por Vargas-Canales *et al.*, (2022), quienes mencionan que un sistema de innovación en el sector agroalimentario está constituido por Universidades, Instituciones, Organizaciones y Empresas que interactúan a través de redes compartiendo conocimientos, información, prácticas y experiencias sobre una tecnología en un actividad específica, e involucra todas las operaciones y transacciones con el fin de satisfacer las demandas de alimentos. Lo anterior incluye a todos los agentes vinculados a la cadena de valor, es decir, los actores relacionados con la proveeduría de insumos, producción primaria, acopio, almacenamiento, procesamiento, transformación, logística y distribución y comercialización.

CONCLUSIONES

La literatura actual sobre difusión de la innovación ha estado dominada por el paradigma del modelo basado en la interacción de los agentes con algunos elementos de las otras corrientes, ya que captura la heterogeneidad de los agentes y permite el modelado detallado de las interacciones mediadas por redes en los territorios.

De manera general es posible identificar claramente las principales funciones y roles de los agentes de la innovación en el sector agroalimentario a pesar de la diversidad que existe. Es conveniente mencionar que se trata de agentes heterogéneos, diversos e incluso polifacéticos.

Contar con una caracterización clara de los agentes que desarrollan, usan, gestionan y difunden innovaciones permite integrar investigaciones más claras y pertinentes sobre los procesos de innovación que se desarrollan en el sector agroalimentario. Así como identificar los mecanismos y estrategias que permitan dinamizar la difusión de innovaciones en el sector agroalimentario.

REFERENCIAS

- Arango Londoño JF. 2012. La gestión de la innovación como la gestión de un ecosistema heterogéneo y estructurado. Cuadernos de Gestión, 12, 125–137. <https://doi.org/10.5295/cdg.110305ja>
- Arellano HA, Ortega PC. 2005. Las Redes Sociotécnicas en Torno a la Investigación Biotecnológica del Maíz. Convergencia Revista de Ciencias Sociales, 38, 255–276.
- Biggs T, Shah MK. 2006. African SMES, networks, and manufacturing performance. Journal of Banking and Finance, 30(11), 3043–3066. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2006.05.004>
- Bloor D. 1991. Knowledge and Social Imagery. University of Chicago Press. 2nd ed. Chicago, IL, USA.
- Bullinger H-J, Auernhammer K, Gomeringer A. 2004. Managing innovation networks in the knowledge-driven economy. International Journal of Production Research, 42(17), 3337–3353. <https://doi.org/10.1080/00207540410001695970>
- Carlsson B, Stankiewicz R. 1991. On the nature, function and composition of technological systems. Journal of Evolutionary Economics, 1(2), 93–118. <https://doi.org/10.1007/BF01224915>
- Carlsson, Bo, Jacobsson S, Holmén M, Rickne A. 2002. Innovation systems: analytical and methodological issues. Research Policy, 31, 233–245. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00138-X)
- Eito-Brun R. 2020. Synergies Between Web-Based Open Innovation Platforms and Open Information Infrastructures (pp. 254–261). https://doi.org/10.1007/978-3-030-30443-0_23
- Ferreiro M, Sousa C. 2019. Governance, institutions and innovation in rural territories: The case of Coruche innovation network. Regional Science Policy & Practice, 11(2), 235–250. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12147>
- García-Sánchez EI, Vargas-Canales JM, Palacios-Rangel MI, Aguilar-Ávila J. 2018. Sistema de innovación como marco analítico de la agricultura protegida en la región centro de México. Cuadernos de Desarrollo Rural, 15(81), 1–24. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr15-81.sima>
- Geels FW, Schot J. 2007. Typology of sociotechnical transition pathways. Research Policy, 36(3), 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Griliches Z. 1957. Hybrid corn: An exploration in the economics of technological change. Econometrica, 25(4), 501–522.
- Grovermann C, Wossen T, Muller A, Nichterlein K. 2019. Eco-efficiency and agricultural innovation systems in developing countries: Evidence from macro-level analysis. PLoS ONE, 14(4), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214115>
- Hermans F, Geerling-Eiff F, Potters J, Klerkx L. 2019. Public-private partnerships as systemic agricultural innovation policy instruments – Assessing their contribution to innovation system function dynamics. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 88(October 2018), 76–95. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2018.10.001>

- Kamara LI, Dorward P, Lalani B, Wauters E. 2019. Unpacking the drivers behind the use of the Agricultural Innovation Systems (AIS) approach: The case of rice research and extension professionals in Sierra Leone. *Agricultural Systems*, 176(August), 102673. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102673>
- Kaminski PC, de Oliveira AC, Lopes TM. 2008. Knowledge transfer in product development processes: A case study in small and medium enterprises (SMEs) of the metal-mechanic sector from São Paulo, Brazil. *Technovation*, 28(1–2), 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2007.07.001>
- Klerkx L, Leeuwis C. 2009. Establishment and embedding of innovation brokers at different innovation system levels: Insights from the Dutch agricultural sector. *Technological Forecasting and Social Change*, 76(6), 849–860. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.10.001>
- Latour B. 2005. *Reassembling the social*. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Lefebvre H. 1991. *The production of place*. Donald Nicholson-Smith. Basil Blackwell. Oxford, UK.
- Maggioni MA, Uberti TE. 2009. Knowledge networks across Europe: Which distance matters? *Annals of Regional Science*, 43, 691–720. <https://doi.org/10.1007/s00168-008-0254-7>
- Minh TT. 2019. Unpacking the systemic problems and blocking mechanisms of a regional agricultural innovation system: An integrated regional-functional-structural analysis. *Agricultural Systems*, 173(January), 268–280. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.009>
- Monge PM, Hartwich F. 2008. Análisis de Redes Sociales aplicado al estudio de los procesos de innovación agrícola. *REDES-Revista Hispana Para El Análisis de Redes Sociales*, 14(2), 1–31. <https://doi.org/978-950-34-0513-0>
- Nosova SS, Makar SV, Chapljuk VZ, Medvedeva AM, Semenova AN. 2018. Collaborative nature of innovative economy. *Espacios*, 39(41). <http://www.revistaespacios.com/a18v39n41/a18v39n41p32.pdf> (Recuperado: Febrero 2022).
- Oliveira P, Turčínková J. 2019. Human Capital, Innovation and Internationalization of Micro and Small Enterprises in Rural Territory – a Case Study. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 67(2), 545–563. <https://doi.org/10.11118/actaun201967020545>
- Pedroza-Zapata ÁR, Silva-Flores ML. 2020. Ecosistema Universitario de Ciencia, Tecnología, Innovación y Emprendimiento. *Magis, Revista Internacional de Investigación En Educación*, 12(25), 93–110. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.m12-25.euct>
- Pérez Hernández M del PM. 2016. Las organizaciones intermedias en los procesos de innovación en México. *Perfiles Latinoamericanos*, 24(48), 161–183. <https://doi.org/10.18504/pl2448-007-2016>
- Pittaway L, Robertson M, Munir K, Denyer D, Neely A. 2004. Networking and innovation: a systematic review of the evidence 200. *International Journal of Management Reviews*, 5–6(3–4), 137–168. <https://doi.org/10.1111/j.1460-8545.2004.00101.x>
- Rogers EM. 1995. *Diffusion of innovations*. Newyork Free Press. 4th ed. New York, NY, USA.
- Ruiz Castañeda WL, Quintero Ramírez S, Robledo Velásquez J. 2016. Impacto de los Intermediarios en los Sistemas de Innovación. *Journal of Technology Management & Innovation*, 11(2), 130–138. <https://doi.org/10.4067/S0718-27242016000200013>
- Serres M. (1982). *The Parasite*. Lawrence R. Schehr. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, MD, USA:
- Tweedale J, Ichalkaranje N, Sioutis C, Jarvis B, Consoli A, Phillips-Wren G. 2007. Innovations in multi-agent systems. *Journal of Network and Computer Applications*, 30(3), 1089–1115. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2006.04.005>
- Vargas-Canales JM, Palacios-Rangel MI, García-Cruz JC, Camacho-Vera JH, Sánchez-Torres Y, Simón-Calderón C. 2022. Analysis of the impact of the regional innovation system of protected agriculture in Hidalgo, Mexico. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2022.2039246>
- Vargas-Canales JM, Palacios-Rangel MI, Aguilar-Ávila J, Ocampo-Ledesma JG, Kreimer P, Ortiz-Martínez G. 2018. Technological innovation in a case of protected agriculture in Mexico. *Revista de Geografía Agrícola*, 61(2), 9–38. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2017.61.02>
- Wu B, Zhang L. 2013. Farmer innovation diffusion via network building: A case of winter greenhouse diffusion in China. *Agriculture and Human Values*, 30(4), 641–651. <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9438-6>
- Zhang H, Vorobeychik Y. 2019. Empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: a critical review. *Artificial Intelligence Review*, 52(1), 707–741. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9577-z>



Agrociencia

Volumen 56, Número 2

16 de febrero - 31 de marzo, 2022