

# Agrociencia

eISSN: 2521-9766

VOLUMEN 57, NÚMERO 3 | 1 DE ABRIL - 15 DE MAYO, 2023 | MÉXICO



**AGRICULTURA**  
SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

## DIRECTORIO

---

### EDITOR EN JEFE DE AGROCIENCIA

Fernando Carlos Gómez Merino

### 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  
Said Infante Gil  
Leopoldo E. Mendoza Onofre  
José A. Villaseñor Alva

### RESPONSABLES DE LA EDICIÓN

Fernando Carlos Gómez Merino

### FORMACIÓN, DISEÑO Y MAQUETACIÓN

L. Brenda Espejel Lagunas

### TRADUCTORES

Inés Enriquez  
Diane Fumiko Miyoshi Udo  
Elena A. Preciado Gutiérrez  
Nicolas Crossa  
Joel Castillo González

### COSECHADOR DE METADATOS

Moises Quintana Arévalo

### PLATAFORMA

Ana Luisa Mejía Sandoval  
L. Brenda Espejel Lagunas

### APOYO SECRETARIAL

Yolanda Feroso Meraz

DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS, **Volumen 57, Número 3, 1 de abril - 15 de mayo, 2023**, Agrociencia es una publicación sesquimensual editada por el Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP 56264. Tel. 5959284427. www.colpos.mx. Editor responsable: **Dr. Fernando Carlos Gómez Merino**. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2021-031913431800-203. eISSN: 2521-9766, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Fecha de última modificación, **12 de mayo del 2023**.

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:

#### AGROCIENCIA

Guerrero #9, Esquina Avenida Hidalgo.  
56220. San Luis Huexotla. Texcoco, Estado de México

Teléfono: 595 92 84427

<https://agrociencia-colpos.org>  
~~~~~

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:** Toro.

**Fotografía y créditos:** <https://www.pexels.com>



# AGRICULTURA

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

ANIMAL SCIENCE \* CIENCIA PECUARIA

---

CUTTING FREQUENCY IN CAYMAN GRASS (*Urochloa* HYBRID) ON THE  
CALORIFIC POWER OF THE MEXICAN WET TROPIC

\*

FRECUENCIA DE CORTE EN PASTO CAYMAN (*Urochloa* HÍBRIDO) EN EL  
PODER CALORÍFICO EN EL TRÓPICO HÚMEDO MEXICANO

425

Joel Ventura-Ríos, Adelaido Rafael Rojas-García, Iliana Barrera-Martínez,  
Alejandro García-Salas, María de los Ángeles Maldonado-Peralta

IDENTIFICATION AND CHEMICAL COMPOSITION OF FORAGE  
RESOURCES CONSUMED BY GOATS IN THE MIXTECA REGION OF  
OAXACA, MEXICO

\*

IDENTIFICACIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE RECURSOS  
FORRAJEROS CONSUMIDOS POR CAPRINOS EN LA MIXTECA DE  
OAXACA, MÉXICO

454

Jacinto Efrén Ramírez-Bribiesca, José Carlos López-Ojeda,  
Ramón Robles-Soriano, Serafín Jacobo López-Garrido

APPLIED MATHEMATICS-STATISTICS-COMPUTER SCIENCE \*  
MATEMÁTICAS APLICADAS, ESTADÍSTICA Y COMPUTACIÓN

---

IDENTIFICATION OF DISEASE IN TOMATO LEAVES USING MACHINE  
LEARNING CLASSIFIERS AND DIGITAL IMAGES

\*

IDENTIFICACIÓN DE ENFERMEDADES EN HOJAS DE TOMATE POR  
MEDIO DE CLASIFICADORES DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO  
E IMÁGENES DIGITALES

476

Juan Pablo Ambrosio-Ambrosio, Juan Manuel González-Camacho,  
Abraham Rojano-Aguilar, David Hebert del Valle-Paniagua

BIOACTIVITY OF *Pseudomarasmius nidus-avis* AND OTHER WILD FUNGI  
FROM MESOPHYTIC MOUNTAIN FOREST IN MEXICO IN CONTROL OF  
PHYTOPATHOGENS

\*

BIOACTIVIDAD DE *Pseudomarasmius nidus-avis* Y OTROS HONGOS  
SILVESTRES DEL BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA DE MÉXICO EN EL  
CONTROL DE FITOPATÓGENOS

508

J. Francisco **Castillo-Esparza**, Leticia **Montoya**, Damaris **Desgarenes**,  
Gloria **Carrión**, Antero **Ramos**, Enrique **César**, Randy **Ortiz-Castro**,  
Victor M. **Bandala**

SODIUM CHLORIDE AND SILICON AFFECT YIELD AND  
QUALITY OF TOMATO FRUITS

\*

CLORURO DE SODIO Y SILICIO AFECTAN RENDIMIENTO  
Y CALIDAD DE FRUTOS DE TOMATE

536

Víctor Hugo **Carbajal-Vázquez**, Fernando Carlos **Gómez-Merino**,  
Gabriel **Alcántar-González**, José Andrés **Herrera-Corredor**,  
Adriana **Contreras-Oliva**, Libia Iris **Trejo-Téllez**

PRESENCE OF INTERNATIONALLY BANNED PESTICIDES IN DOMESTIC  
PERUVIAN QUINOA DURING COVID-19 PANDEMIC

\*

PRESENCIA DE PESTICIDAS PROHIBIDOS A NIVEL INTERNACIONAL EN  
QUINUA PERUANA DURANTE LA PANDEMIA DE COVID-19

564

Angie **Higuchi**, Rocío **Maehara**, Roger **Merino**,  
Franklin **Ibáñez**, María Matilde **Schwalb**

NATURAL RENEWABLE RESOURCES \* RECURSOS NATURALES RENOVABLES

---

TRADITIONAL AND UPDATED EVALUATION OF THE RANGELAND SITE  
AND CONDITION IN THE SEMIARID SCRUB OF THE HIGH PLATEAU

\*

EVALUACIÓN TRADICIONAL Y ACTUALIZADA DE SITIO Y CONDICIÓN  
DE AGOSTADERO EN MATORRALES SEMIÁRIDOS DEL ALTIPLANO

589

Juan Rogelio Aguirre-Rivera, Luis Octavio Negrete-Sánchez,  
Rigoberto Castro-Rivera

SOCIOECONOMICS \* SOCIOECONOMÍA

---

NETWORK STRUCTURE FOR THE MOBILITY OF BOVINES PRODUCED IN  
THE STATE OF CHIHUAHUA, MEXICO, 2010–2019

\*

ESTRUCTURA DE LA RED PARA LA MOVILIDAD DE BOVINOS  
PRODUCIDOS EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, MÉXICO, 2010–2019

622

Nicolas Callejas-Juárez, Graciela del Carmen Sandoval-Luján,  
José María Salas- González, Eduardo Domínguez-Arrieta

## CUTTING FREQUENCY IN CAYMAN GRASS (*Urochloa* HYBRID) ON THE CALORIFIC POWER OF THE MEXICAN WET TROPIC

Joel Ventura-Ríos<sup>1</sup>, Adelaido Rafael Rojas-García<sup>2</sup>, Iliana Barrera-Martínez<sup>3</sup>, Alejandro García-Salas<sup>1</sup>, María de los Ángeles Maldonado-Peralta<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C. P. 25315.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia No. 2, Cuajinicuilapa, Guerrero, México. C. P. 41940.

<sup>3</sup> CONACYT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Camino Arenero 1227, El Bajío, Zapopan, Jalisco, México. C. P. 45019.

\* Author for correspondence: mmaldonado@uagro.mx

### ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of cutting frequency in Cayman grass (*Urochloa* HYBRID) on biomass yield, moisture, ash, ethereal extract, neutral detergent fiber (FDN), acid detergent fiber (FDA), acid detergent lignin (LDA), crude protein (PC), calorific value, and theoretical bioethanol yield. Four cutting frequencies were established as treatments: 30, 60, 90, and 120 d, arranged in a completely randomized block design with three replications. Data were analyzed with GLM (SAS), and means were compared with the Tukey test ( $p \leq 0.05$ ). The highest biomass production ( $11.9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ), calorific value ( $15.1 \text{ MJ kg}^{-1}$ ), and LDA (5.7 %) were obtained at the 120 d cutting frequency. The concentration of FDN (61.8 %), FDA (43.6 %), cellulose (38.1 %), and theoretical bioethanol production ( $218.4 \text{ L Mg}^{-1} \text{ MS}$ ) were statistically different at the cutting frequency of 90 d. The values of hemicellulose (18.7 %) and ethereal extract (1.8 %) were statistically different at the 60 d-cutting frequency; while PC (9.7 %) and ash (11.8 %) showed significant differences at the 30-d cutting frequency. Based on the biomass yield and calorific value of Cayman grass, it can be considered as a potential plant material for cellulosic ethanol production.

**Keywords:** biofuel, energy crop, cutting frequency, grass.

### INTRODUCTION

In recent decades, the imminent depletion of petroleum, the steady increase in the price of fossil fuels, and their unequivocal contribution to global warming has spurred research into the production of biofuels using fodder as raw material.

A biofuel is defined as a high-energy chemical generated from biological processes derived from biomass or living organisms (Jhang *et al.*, 2020); therefore, they are considered renewable and environmentally friendly. In addition, they can contribute to mitigate the problem of global warming and climate change.

The most common liquid bioenergies are biodiesel and bioethanol (Zhao *et al.*, 2009), which can replace fossil fuels or be used as additives in hydrocarbon composite

**Citation:** Ventura-Ríos J, Rojas-García R, Barrera-Martínez I, García-Salas A, Maldonado-Peralta MA. 2023. Cutting frequency in Cayman grass (*Urochloa* hybrid) on the calorific power of the Mexican wet tropic.

Agrociencia 57(3): 425-453.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2581>

**Editor in Chief:**  
 Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: August 11, 2022.  
 Approved: January 27, 2023.  
**Published in Agrociencia:**  
 April 20, 2023.

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



products (Sun *et al.*, 2021). In the particular case of bioethanol, one of the most discussed aspects is the raw material from which it will be obtained. Thus, the so-called first-generation bioethanol is obtained from food products such as corn, sorghum, and sugarcane; however, this entails the ethical dilemma of using food to generate energy. Second generation bioethanol is produced from lignocellulosic materials, avoiding the use of foodstuffs.

Energy crops are considered feedstock for second generation bioethanol and among these we find grasses and  $C_4$  plants, which are highly efficient at converting sunlight into biomass (Ventura-Ríos *et al.*, 2022).

Calorific value is the key parameter for assessing fuel quality and available energy per unit mass (Ram and Salam, 2012), and in grasses it can reach up to  $20 \text{ kJ kg}^{-1}$  (Sun *et al.*, 2021). Grass biomass, according to Mohammed *et al.* (2015), is chemically composed of cellulose (34 %), hemicellulose (20 %), lignin (24 %), protein (11.3 %), silica (1 %), and other minerals, and also includes FDN (75 %) and FDA (45 %; Maia *et al.*, 2014). The components in the cell wall and cell content can vary according to the geographic area, phenological stage of the plant, and cell tissue analyzed. For example, Bernal-Flores *et al.* (2017) report variability in lignin concentration by studying various tissues of 30 genotypes of Banderilla grass [*Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr.] in Mexico.

It is also important to evaluate holocellulose (Santiago-Ortega *et al.*, 2016), fixed carbon, volatile material, moisture, and extractives (Mohammed *et al.*, 2015) to know the physical and chemical properties of grasses. Given the complexity of the cell wall of grasses, the biomass must be pretreated to break the lignin bonds and favor the saccharification process by up to 95 % (Sun *et al.*, 2021), allowing us to obtain  $311.5 \text{ L}$  of bioethanol  $\text{Mg}^{-1}$  from biomass or  $2967 \text{ L ha}^{-1}$  (Zhao *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2014).

Varieties of the genus *Urochloa* ( $C_4$ ), used in animal feed, have been introduced in tropical Mexico. In 2011, the company Papatotla, S. A. de C. V., based in Mexico, released the hybrid Cayman with very particular qualities to improve animal production (Hare *et al.*, 2015). However, research on plant physiology, pasture behavior, and chemical composition of this grass is limited, and for a better utilization, it is necessary to determine the optimum age of regrowth, where it reaches the highest biomass production and chemical composition.

In Mexico, different cultivars of the genera *Cenchrus* (Ventura *et al.*, 2021a), *Megathyrsus* (Ventura-Ríos *et al.*, 2021b) and *Urochloa* (Santiago *et al.*, 2016) have recently been evaluated to determine their agronomic performance, calorific value, immediate analysis, and production of fermentable sugars to obtain cellulosic ethanol. Therefore, the hypothesis of this research was to test if regrowth age influences the energy concentration of Cayman grass. The objective of the present study was to evaluate at what age of regrowth of four cutting frequencies (30, 60, 90, and 120 d), the highest forage quantity and quality is obtained and its influence on the calorific value, biomass production, chemical composition, and theoretical bioethanol yield of Cayman grass (*Urochloa* hybrid cv. CIAT BR02/1752), under rainfed and fertilized conditions in the Mexican humid tropics.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The research was conducted at the “Papaloapan” Experimental Field of the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research (INIFAP), located at 18° 06' N and 95° 31' W, at 65 m altitude, in the municipality of Isla, Veracruz, Mexico.

The climate is classified as Aw, hot sub-humid with 80 % of the seasonal rainfall in summer; the 40-year average annual precipitation and temperature were 1142 mm and 25.8 °C, respectively (García, 2004). The soils are vertisols with a pH of 5.4, clayey-loam texture and organic matter is 2.6 % (Enríquez and Romero, 1999).

### Pasture management and treatments

Cayman grass (*Urochloa* hybrid cv. CIAT BR02/1752) was sown on July 22, 2017 at a rate of 10 kg ha<sup>-1</sup> of pure viable seed, which was provided by Papalotla S. A. de C. V. de México. The soil was prepared with fallow and two passes of harrow, and furrowed 0.50 m apart. The experimental plots were established at 5 m x 16 m, with three replications. Granular fertilizer [120-80-00 kg ha<sup>-1</sup>; N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O] was used at 43 and 112 d after sowing by hand. Prior to sampling, a uniformity cut was made with machetes at a height of 15 cm above ground level. Sampling and fertilization were done in the morning throughout the experiment. The experiment was concluded on July 24, 2018. Four cutting frequencies were established as treatments: 30, 60, 90, and 120 d interval, carried out for 365 d.

### Variables evaluated

Dry matter (MS) determinations were carried out at the Lignocellulosic Materials Laboratory of INIFAP in San Martinito, Puebla, Mexico; with the exception of nitrogen (N) concentration, which was carried out at the Soil Fertility and Environmental Chemistry Laboratory of the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, in Montecillo, State of Mexico, Mexico.

The variables evaluated were biomass yield, dry matter, nitrogen (N), neutral detergent fiber (FDN), acid detergent fiber (FDA), cellulose, hemicellulose, acid detergent lignin (LDA), ethereal extract, ash, calorific value, moisture, and theoretical bioethanol yield.

### Biomass yield

Biomass production was determined at 30, 60, 90, and 120 d intervals after uniformity cutting for one year. In each plot, on each sampling date, a 1 m<sup>2</sup> metal frame was thrown randomly on five occasions in each experimental unit, and cut at 20 cm residual forage height.

Green harvested biomass was weighed on a precision, pre-calibrated Ohaus balance with a capacity of 6.2 kg±0.1 g (GT-4000®; TEquipment, Parsippany, NJ, USA); then a subsample was weighed and immediately placed in pre-labeled paper bags in a forced convection oven (FE-243A; Felisa; Guadalajara, Mexico) at 55 °C until constant weight, and then weighed.

### Preparation of samples for analysis

The dry samples were pulverized in a Wiley® mill (Arthur H. Tomas, Philadelphia, PA, USA) and passed through No. 40 (0.42 - 1.00 mm) and No. 60 (0.25 - 0.42 mm) sieves.

### Chemical analysis

Samples were incinerated for 2 h at 600 °C in a muffle (Thermo Scientific, BF 51842, Fowlerville, MI, USA) to obtain the concentration of organic matter and ash according to ASTM D 1102-84. The crude protein (PC) concentration was determined by the semi-micro Kjeldahl method ( $N \times 6.25$ ), while the ethereal extract was determined in a Soxhlet extractor (PYREX® Corning Life Sciences, 3840-L, Corning, NY, USA). Neutral detergent fiber, acid detergent fiber, and acid detergent lignin concentrations were obtained sequentially on the ANKOM<sup>200®</sup> fiber analyzer (Ankom Technology, Fairport, NY, USA), using Ankom® F57 filter bags with a pore size of 30 µm. The FDN was determined with thermostable  $\alpha$ -amylase (ANKOM Technology<sup>200®</sup>) to solubilize sugars, starch and pectins, and sodium sulfite (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) to remove starch and nitrogen (Van Soest *et al.*, 1991). Cellulose (CL) and hemicellulose (HC) were calculated with the following formula:  $CL = FDA - LDA$ , while  $HC = FDN - FDA$ , respectively.

### Calorific value

The calorific value was determined in an adiabatic bomb calorimeter (Isoperibol, Parr 1266, Parr Instrument Company; Moline, IL, USA) according to ASTM standard (E711) and calorimeter operating instructions (Parr, 1999) at  $30 \pm 0.5$  °C, with compressed pellets of 1 g maximum.

At the same time, moisture content was determined in a previously calibrated Ohaus thermobalance (MB45®; TEquipment; Parsippany, NJ, USA). To determine this variable, ground samples passed through No. 60 sieves (0.25 - 0.42 mm) were used, with five determinations for each sample, and 15 replicates for each FC.

### Theoretical bioethanol yield

The theoretical bioethanol yield (RTB) (equation 3) was determined using the formulas of Badger (2002) and Dien (2010). The formulas include hydrolysis, chemical, and stoichiometric reactions of cellulose (equation 1) and hemicellulose (equation 2) transformation into ethanol.

Cellulose

$$RTBC - C * C \text{ g/c} * Ecc * Ret * Efg * Det \quad (1)$$

Hemicellulose

$$RTBH - H * H \text{ x/h} * Ech * Ret * Efx * Det \quad (2)$$

Total

$$RTB - RTBC + RTBH \quad (3)$$

where  $RTB$ :  $L\ Mg^{-1}\ MS$ ,  $C$ :  $kg_{cellulose}\ Mg^{-1}\ biomass$ ;  $H$ :  $kg_{hemicellulose}\ Mg^{-1}\ biomass$ ;  $C_{g/c}$ : glucose concentration  $1.111\ (kg_{glucose}/kg_{cellulose})$ ;  $H_{x/h}$ : xylose concentration  $1.136\ (kg_{xylose}/kg_{hemicellulose})$ ;  $E_{cc}$ : cellulose conversion efficiency (0.76);  $E_{ch}$ : hemicellulose conversion efficiency (0.90);  $Ret$ : stoichiometric ethanol yield ( $0.511\ kg_{ethanol}/kg_{glucose}$ ;  $0.511\ kg_{ethanol}/kg_{xylose}$ );  $E_{fg}$ : glucose fermentation efficiency (0.75);  $E_{fx}$ : xylose fermentation efficiency (0.50);  $D_{et}$ : ethanol density ( $0.78\ Mg\ m^{-3}$ ). In addition, the theoretical annual amount of bioethanol (L) produced by one ha of Cayman grass was calculated for each FC. The procedure consisted of multiplying the theoretical bioethanol yield per unit of biomass by the annual biomass yield according to the methodology by Badger (2002) and Dien (2010).

### Experimental design and statistical analysis

Data were analyzed as a completely randomized design, where Cayman grass cutting frequency was considered as treatments (30, 60, 90, and 120 d) with three replications per treatment.

An analysis of variance (Anova) was performed to identify the effect of cutting frequency on response variables using the GLM/SAS procedure, and treatment means were compared with the Tukey test ( $p \leq 0.05$ ) using SAS for Windows version 9.3 (SAS, 2011).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Biomass production

Annual biomass production increased as FC increased (Table 1;  $p \leq 0.05$ ), where the highest production was observed every 120 d ( $11.9\ Mg\ MS\ ha^{-1}\ year^{-1}$ ). The cut at every 120 d was 20, 40, and 67 % higher than the FC at 90, 60, and 30 d, respectively. Therefore, in Toledo grass (*Urochloa brizantha*) Santiago *et al.* (2016), reported  $11.1\ Mg\ ha^{-1}\ year^{-1}$  every 30 d, which exceeded by  $4\ Mg\ ha^{-1}\ year^{-1}$  that was found in the present study. Likewise, Rojas-García *et al.* (2018) conducted a study in tropical Mexico during

**Table 1.** Biomass and energy production of Cayman grass (*Urochloa* hybrid cv. CIAT BR02/1752) at four cutting frequencies in the municipality of Isla, Veracruz, Mexico.

Cut frequency (days)	Yield ( $Mg\ ha^{-1}\ year^{-1}$ )	Calorific value ( $MJ\ kg^{-1}$ )	Energy ( $GJ\ ha^{-1}\ year^{-1}$ )	Moisture (%)
30	7.1d	14.9b	105.6d	8.4a
60	8.4c	14.8b	126.1c	8.4a
90	9.9b	14.6b	145.2b	8.7a
120	11.9a	15.1a	180.6a	8.0b
Media	9.35	14.9	139.4	8.4
EE	1.03	0.10	15.9	0.14

EE: Standard error. Different letters show differences among cuts (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

the dry season under rainfed conditions and without fertilization, where the result obtained for Cobra grass (*Urochloa* hybrid BR02/1794) was 2.5 Mg ha<sup>-1</sup>, which was lower than that obtained in the present research. Therefore, the conditions in the municipality of Isla, Veracruz, are better for crop development, together with higher rainfall (> 300 mm).

There are other varieties of tropical grasses that exceed 12 Mg of biomass, such as Taiwan grass (*Cenchrus purpureus*; Ventura-Ríos *et al.*, 2021a). However, the chemical composition of grasses presents changes in the cell wall and cell content as they advance in physiological maturity. Therefore, it is important to report the energy content and its potential as biofuel as a function of the cutting period.

### Calorific value and moisture content

The FC every 120 d showed higher calorific value ( $p \leq 0.05$ ; Table 1) over the other FCs because the plant at that FC had lower moisture content ( $p \leq 0.05$ ); the FC of 30, 60, and 90 d were similar ( $p \leq 0.05$ ). The highest energy production per ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> corresponded to the 120 d FC (180.6 GJ ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) which was different ( $p \leq 0.05$ ) from the other FCs, exceeding the 30 d FC by 71 % (equivalent to 75 GJ ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>); 43 % (equivalent to 54.5 GJ ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) to the 60 d FC, and 24 % (equivalent to 35.4 GJ ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) to the 90 d FC (Table 1).

Grass biomass is of great interest due to its carbon neutrality, its thermal potential for energy production, and its composition and chemical structure favor the concentration of energy per unit of biomass (Wang *et al.*, 2021). It is important to identify the calorific value of grass biomass to evaluate its potential as a feedstock for bioenergy production, and also determine the moisture content of the biomass, because it decreases the energy expression within the biomass (Majumder *et al.*, 2008). Moisture content was similar at 30, 60, and 90 d ( $p > 0.05$ ; Table 1) and difference was only observed at 120 d ( $p \leq 0.05$ ), which showed the lowest moisture content. The calorific value in the present experiment ranged from 14.9 to 15.1 MJ kg<sup>-1</sup>, which was lower than that reported by Said *et al.* (2019) who found 16.7 MJ kg<sup>-1</sup> in Napier grass (*C. purpureus*). Likewise, Karampinis *et al.* (2012) reported 18.7 MJ kg<sup>-1</sup> in miscanthus (*Miscanthus giganteus*).

The average obtained in this experiment was 14.9 MJ kg<sup>-1</sup>, which is lower by 1.6 and 3.4 MJ kg<sup>-1</sup> than the average reported by Santiago *et al.* (2016) and Ventura-Ríos *et al.* (2021a) who found 16.5 and 18.3 MJ kg<sup>-1</sup> in Toledo (*U. brizantha*) and Maralfalfalfa (*C. purpureus*) grasses, respectively, under warm sub-humid climate conditions in the municipality of Isla, Veracruz, Mexico, by fertilization with the following formula: 120-80-00 kg ha<sup>-1</sup>. On the other hand, grasses of the genus *Urochloa* (C<sub>4</sub>) have a high efficiency to convert sunlight into biomass compared to trees, which allows reaching biomass yields exceeding 28 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> under fertilization systems (Santiago *et al.*, 2016). In addition, its calorific value can exceed 20 kJ kg<sup>-1</sup> (Sun *et al.*, 2021), which is a favorable quality to consider biomass as a suitable raw material for renewable energy production, compared to coniferous and broadleaved wood, whose calorific value can be 20.5 and 20.2 MJ kg<sup>-1</sup>, respectively (Ram and Salam, 2012).

### Crude protein

The highest crude protein concentration was found at 30 d, ( $p \leq 0.05$ ; Table 2). As FC increases, plant N concentration decreases, as it happened in this study, when going from 30 to 90 d the protein concentration decreased by 44.3 % and from 30 to 120 d by 55 %. In other studies, conducted in tropical areas of Goiás, Brazil, with the addition of fertilizers based on: 200 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 30 kg ha<sup>-1</sup> N, 60 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O, 2 kg ha<sup>-1</sup> boron, 0.4 kg ha<sup>-1</sup> molybdenum, using as sources: simple superphosphate, potassium chloride, boric acid, and sodium molybdate, Maia *et al.* (2014) reported values of 15 % in *U. brizanta* cv. Piata and Xaraés, and 7.4 % in cv. MG4. Normally, the concentration of N in the plant tends to decrease as physiological maturity advances; however, this element is highly related to the addition of fertilizers, precipitation, and solar radiation. High protein concentration is not desirable in biomass for bioenergy purposes, so it is important to quantify it. The higher the amount of nitrogen, the lower the bioconversion of total sugars (holocellulose) to bioethanol, because the nitrogen present in the cell wall has the capacity to form bridges with ferulic acid and increase the resistance and insolubility of the whole structure (Bidlack *et al.*, 1992).

**Table 2.** Chemical composition of Cayman grass (*Urochloa* hybrid cv. CIAT BR02/1752) at four cutting frequencies in the municipality of Isla Veracruz, Mexico.

Cut frequency (days)	Component (%)					
	PC	FDN	FDA	LDA	Ext. E.	Ash
30	9.7a	52.9d	35.2d	4.4d	1.4c	11.8a
60	6.4b	55.7c	37.0c	4.9c	1.8a	9.6b
90	5.4c	61.8a	43.6a	5.4b	1.2d	8.6c
120	4.3d	61.5b	43.2b	5.7a	1.5b	7.5d
Mean	6.5	58.0	39.7	5.1	1.5	9.4
EE	1.16	2.19	2.14	0.28	0.12	0.91

C: crude protein, FDN: neutral detergent fiber, FDA: acid detergent fiber, LDA: acid detergent lignin. Ext. E.: Ethereal extract, EE: standard error. Different letters per column show differences among cuts (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

The International Energy Agency (IEA) incorporated the term biorefinery, where it defines biomass as a compound of biological origin to produce from this bioenergy and, on the other hand, take advantage of the content of crude fiber, crude protein, and lignin to obtain food, chemicals, and materials (Amore *et al.*, 2016).

### Neutral Detergent Fiber (FDN) and Acid Detergent Fiber (FDA)

The FDN concentration was higher at 90 d ( $p \leq 0.05$ ; Table 2) and exceeded by 17, 11, and 0.5 % the FC of 30, 60, and 120 d, respectively. The highest FDA concentration was found at 90 d and was different from the other cutting frequencies ( $p \leq 0.05$ ), exceeding by 24, 18, and 1 % the FC of 30, 60, and 120 d, respectively. Therefore, FDN concentration

increased by 17 % from 30 to 90 d cut; the same occurred with Maralfalfa grass (*C. purpureus*), where a 12 % increase was observed as FC increased from 30 to 120 d of harvest (Ventura-Ríos *et al.*, 2019). Furthermore, Maia *et al.* (2014) reported FDN values of 63.7 and 75.2 % in *U. brizantha* cv. Piata and MG4, respectively, indicating that FDN concentration increases as physiological maturity in the plant advances, given that FDN evaluates the concentration of cellulose, hemicellulose, and lignin. On the other hand, when evaluating the growth curve of Cobra grass (*Urochloa hybrid* BR02/1794), Rojas-García *et al.* (2018) reported at 63 d of regrowth concentrations of 79 and 44.7 % for FDN and FDA, respectively, which are similar to what was found in the present experiment. There is little information on the use of fiber for bioenergy purposes, its usefulness is closely related to the paper industry or directly in combustion issues replacing coal (Samson *et al.*, 2005) or for animal feed (Maia *et al.*, 2014).

#### Lignin acid detergent

As plant age increased, lignin concentration also increased, and was higher at 120 d, which exceeded by 29, 16, and 5.5 % the FC at 30, 60, and 90 d, respectively ( $p \leq 0.05$ ; Table 2). In other studies, values very similar to those obtained in the present experiment have been found. For example, Wongwatanapaiboon *et al.* (2012) reported concentrations of 5.8, 5.0, and 4.7 % for Atratum (*Paspalum atratum*), Pangola (*Digitaria decumbens*) and Ruzi (*Urochloa ruziziensis*) grasses, respectively.

High concentrations of LDA in biomass as biofuel feedstock are undesirable. Lignin is a highly complex polymer formed by phenyl-propane units (*p*-coumaryl, coniferyl and sinapyl alcohols), and is found within cell wall matrices in grasses. The biosynthesis of lignin as the plant progresses through its phenological stage, changes in its concentration, structure, and its hexose (glucose) and pentose (hemicelluloses) linked bonds (Li and Chapple, 2010).

Lignin, being a hydrophobic material, the water contained in the cell wall matrix is expelled, allowing the plant flexibility, permeability and modifying its rigidity, so that grasses during their growth and development, depending on the climate and environmental factors where they develop, tend to modify the concentration of this compound in their structure (Hatfield *et al.*, 2017). Therefore, it is important to account for this compound in the biomass, since a higher concentration of lignin will limit the efficiency of the saccharification process, also obtaining fermentable sugars (glucose, fructose, sucrose, mannose, xylose, etc.), thus limiting the quality of the forage biomass (Van Soest, 1994). For this reason, it is desirable to obtain raw materials with low lignin content (Mohammed *et al.*, 2015; Vogel *et al.*, 2017).

#### Ethereal extract

The highest ethereal extract concentration was found at 60 d, which was different ( $p \leq 0.05$ ) and exceeded the FC at 90, 30, and 120 d by 50, 28, and 20 %, respectively (Table 2). In previous research, Ventura-Ríos *et al.* (2019) reported 1.8 % ethereal extract in Maralfalfa grass (*C. purpureus*), when cut at 90 d. However, the concentration of extracts can be higher than 10 % (Mohammed *et al.*, 2015; Ventura-Ríos *et al.*, 2021a).

The ethereal extract in grasses has a heterogeneous composition, basically of lipids (galactolipids, triglycerides, and phospholipids) and other non-polar compounds that can be extracted by solvents, such as: phosphatides, steroids, pigments, liposoluble vitamins, and waxes (Van Soest, 1994).

The compounds that form the ethereal extract cannot be transformed to ethanol, so lignocellulosic biomass with a higher concentration of extractives will cause a lower ethanol yield. Quantification of total extracts is relevant in physical and chemical analyses, since this compound has the ability to limit bioenergetic expression and alter biomass chemical results.

### Ash

The highest ash concentration was found at 30 d, which was different from the other FCs ( $p \leq 0.05$ ; Table 2), exceeding by 23, 37, and 57 % the FCs of 60, 90, and 120 d, respectively. The concentration of ash in the plant was higher in early stages; however, inorganic materials are not desirable in bioenergy evaluations because they interfere with combustion processes, so it is necessary to optimize operating processes and reduce the costs associated with waste production in boilers or heaters.

Values reported in other evaluations with grasses are similar to the present study, e.g., 7 % in *U. brizantha* (Santiago *et al.*, 2016), 8.5 % in *U. decumbens*, 9.5 % in *Chloris gayana*, and 10.6 % in *U. brizantha* cv. Xaraés (Nguku *et al.*, 2016).

Inorganic material in pastures is variable in ash concentration among species; normally up to 12% or more can be found in herbaceous plants and agricultural residues in early stages of growth. However, this compound does not provide any energy value and can otherwise limit the energy expression of biomass (Ram and Salam, 2012).

### Cellulose

Cellulose concentration was higher at 90 d, which was different ( $p \leq 0.05$ ; Table 3), and was 24, 18, and 2 % higher than the FC at 30, 60, and 120 d, respectively. In recent

**Table 3.** Structural carbohydrates of Cayman grass (*Urochloa* hybrid cv. CIAT BR02/1752) at four cutting frequencies in the municipality of Isla, Veracruz, Mexico.

Cut frequency (days)	Component			
	Cellulose		Hemicellulose	
	(%)	(Mg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	(%)	(Mg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )
30	30.8d	2.1d	17.7d	1.2d
60	32.1c	2.7c	18.7a	1.5c
90	38.1a	3.7b	18.1c	1.7b
120	37.4b	4.4a	18.2b	2.1a
Media	34.6	3.2	18.2	1.7
EE	1.84	0.5	0.20	0.19

EE: Standard error. Different letters show differences among cuts (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

research, Santiago *et al.* (2016) in *U. brizantha* grass reported on average 42.1 % cellulose, which is 21 % higher than that obtained in this experiment at the 90 d FC. However, Wongwatanapaiboon *et al.* (2012) in Pangola grass (*D. decumbens*) reported values of 33 %, in Ruzi (*U. ruziziensis*) 33.6 %, and in Elephant grass (*Pennisetum purpureum*) 35.2 %, which was similar to the values found in our study at 60 d FC.

The chemical composition of grasses changes with increasing plant age; however, it is necessary to know the sugar content at different plant ages to maximize the glucose and xylose content per gram of sample and per unit area. Considering biomass yields per ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, calculations indicated that cuttings at every 120 d (4.4 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) produced higher cellulose concentration ( $p \leq 0.05$ ), exceeding by 109, 63, and 19 % the FC at 30, 60, and 90 d, respectively (Table 3).

To produce bioethanol by fermentation, fermentable sugars (mainly monosaccharides) are required as a carbon source for consumption by the microorganisms involved in this bioprocess. Second generation bioethanol uses agro-industrial wastes or energy crops as raw material. Fermentable sugars in these raw materials are obtained from a process that has as a first step a delignification (chemical, physical, mechanical, biological pretreatments or combinations of these) to then make an enzymatic hydrolysis of cellulose and hemicellulose. Hence the importance of having raw materials with a high content of these polymers (Barrera *et al.*, 2016).

### Hemicellulose

The highest hemicellulose concentration was found at 60 d and was 5.6, 3.3, and 3 % higher than the FC at 30, 90, and 120 d, respectively ( $p \leq 0.05$ ; Table 3). In grasses, hemicellulose constitutes 11 to 34 % of biomass, and concentrations similar to the present experiment have been reported in previous work, for example, 18.7 % in Napier grass (*P. purpureum*; Mohammed *et al.*, 2015) and concentrations of 15 to 23 % in Mombaza grass (*P. maximum*) (Ventura-Ríos *et al.*, 2021b). Hemicellulose is made up of six- and five-carbon sugars, hexoses, and pentoses, respectively. However, the microorganisms commonly used to produce ethanol do not have the metabolic capacity to assimilate five-carbon sugars, xylose, and arabinose in the case of hemicellulose (Barrera *et al.*, 2016). For this reason, although monosaccharides or disaccharides can be obtained from hemicellulose, the use of these to produce ethanol will depend on the microorganism used.

### Theoretical bioethanol yield

Based on the calculations proposed by Badger (2002) and Dien (2010), the highest theoretical bioethanol yield per Mg MS, calculated based on glucose and xylose concentrations, was found at 90 d and exceeded by 17, 12, and 1.2 % the FCs at 30, 60, and 120 d, respectively ( $p \leq 0.05$ ; Table 4). Annual bioethanol yield is directly related to harvested biomass production, and in this experiment the highest calculated theoretical yield was found at 120 d ( $p \leq 0.05$ ), which was higher than the FC of 30, 60, and 90 d by 94, 55, and 18.7 %, respectively.

**Table 4.** Theoretical bioethanol yield of Cayman grass (*Urochloa* hybrid cv. CIAT BR02/1752) at four cut frequencies in the municipality of Isla, Veracruz, Mexico.

Cut frequencies (days)	Theoretical bioethanol production	
	(L Mg <sup>-1</sup> MS)	(L ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )
30	186.8d	1326.7d
60	195.5c	1660.9c
90	218.4a	2166.1b
120	215.8b	2572.5a
Mean	204.1	1931.5
EE	7.7	274.6

EE: Standard error. Different letters show differences among cuts (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

In studies conducted in Mexico and other parts of the world under tropical conditions, the different values have been reported for bioethanol yield. For example, in grasses of the genus *U. brizantha* Santiago *et al.* (2016) reported 262.6 to 281.3 L Mg<sup>-1</sup> MS, while Lima *et al.* (2014) reported 311 L Mg<sup>-1</sup> MS, which exceed those found in the present experiment. On the other hand, Ventura-Ríos *et al.* (2021c) reported 227.2 L Mg<sup>-1</sup> MS in Humidicola grass (*Urochloa humidicola*), which is similar to that found in the present study. In other tree evaluation studies, the following values have been reported, for example, Piccolo and Bezzo (2009) reported 284 L Mg<sup>-1</sup> MS in broadleaf trees, which is 39 % higher (equivalent to 80 L Mg<sup>-1</sup> MS) than the average obtained in this experiment; however, comparing coniferous and broadleaf wood sources, tropical grasses (C<sub>4</sub>) are more efficient in transforming sunlight into biomass and provide more sugars per unit area and time (Zhao *et al.*, 2009; Ventura-Ríos *et al.*, 2022). On the other hand, it is important to consider that there are several factors that influence bioethanol production performance. For example, the type of pretreatment and its conditions, the presence of inhibitors that affect the growth and metabolic capacity of the microorganisms, the enzymatic saccharification yield, and the fermentative capacity of the microorganism to produce bioethanol (Souza-Rodrigues *et al.*, 2021). Furthermore, the raw material used to obtain bioethanol is of utmost importance, since its origin, chemical composition, and even morphology will determine, to a large extent, the efficiency of pretreatment and saccharification, and therefore of fermentation (Brito *et al.*, 2003).

The difference in the theoretical yield of second-generation bioethanol basically depends on the content of total sugars and other chemical compounds, including furfural and hydroxymethylfurfural, which alter the conversion efficiency of total sugars into fermentable sugars (glucose, fructose, sucrose, mannose, and xylose). It is also important to consider that lignocellulosic biomass undergoes changes in its structure depending on the cutting season, physiological stage, and plant varieties (Barrera *et al.*, 2016). In this regard, Wongwatanapaiboon *et al.* (2012) reported 2561 L ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> in elephant grass (*P. purpureum*), which is 11 L ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> lower than that found every 120 d.

In other studies conducted in tropical Mexico, Ventura-Ríos *et al.* (2022) reported yields from 2400 to 7936 L ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> in Taiwan grass (*Cenchrus purpureus*), and was higher than in this study by 55.2 to 208.5 % respectively. This is due to the higher biomass production of these *Cenchrus* grasses and the chemical composition of their cellular structure.

Finally, under tropical conditions, C<sub>4</sub> grasses produce biomass yields exceeding 10 Mg ha<sup>-1</sup>, and are acceptable yields of cellulosic bioethanol to partially replace hydrocarbon-based composite products. On the other hand, tropical grasses are an alternative in the production of second-generation bioethanol due to their regrowth capacity, their sugar concentration in their different physiological stages, and the financial investment for their establishment and management.

### CONCLUSIONS

Biomass production of Cayman grass (*Urochloa* hybrid cv. CIAT BR02/1752) increases with increasing plant age. The concentration of lignin and structural carbohydrates in the plant changes with the physiological maturity of the plant and the days of cutting, as indicated by the results of this study where the highest concentrations of lignin, cellulose, and hemicellulose were found at 120, 90, and 60 d, respectively.

The maximum biomass and caloric power values are reached with the 120-day FC, which has a positive impact on bioethanol production per hectare per year. The results of dry matter yield and biomass chemical characteristics indicate that Cayman grass is a feedstock with potential for second generation bioethanol production under tropical conditions.

### REFERENCES

- Amore A, Ciesielski PN, Lin CY, Salvachúa D, Nogué VS. 2016. Development of lignocellulosic biorefinery technologies: Recent advances and current challenges. *Australian Journal of Chemistry* 69 (11): 1201–1218. <https://doi.org/10.1071/CH16022>
- Badger PC. 2002. Ethanol from cellulose: a general review. Trends in new crops and new uses. *In: Janick J, Whipkey A (eds.). Proceedings of the Fifth National Symposium: Atlanta, Georgia, USA.* pp. 17–21.
- Barrera I, Amezcua-Allieri MA, Estupiñan L, Martínez T, Aburto J. 2016. Technical and economical evaluation of bioethanol production from lignocellulosic residues in Mexico: Case of sugarcane and blue agave bagasses. *Chemical Engineering Research and Design* 107: 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.015>
- Bernal-Flores A, Quero-Carrillo AR, Zavaleta-Mancera HA, Pérez-Rodríguez P, Valdez-Carrasco J, Ortega-Cerrilla ME. 2017. Atributos histológicos relacionados con digestibilidad en *Bouteloua curtipendula* (MICHX.) TORR. de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40 (3): 299–308. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.3.299-308>
- Bidlack J, Malone M, Benson R. 1992. Molecular structure and component integration of secondary cell walls in plants. *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science* 72: 51–56.
- Brito, C. J. F., Rodella, R. A., Deschamps, F. C. 2003. Perfil químico da parede celular e suas implicações na digestibilidade de *Brachiaria brizantha* e *Brachiaria humidicola*. *Revista Brasileira de Zootecnia* 32 (6): 1835–1844. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982003000800005>
- Dien BS. 2010. Mass balances and analytical methods for biomass pre-treatment experiments. *In: Vertès AA, Qureshi N, Blaschek H, Yukawa H. (eds.). Biomass to biofuels: strategies for global industries.* Wiley: Chichester, United Kingdom. pp. 213–231. <https://doi.org/10.1002/9780470750025.ch11>

- Enríquez QJF, Romero MJ. 1999. Tasa de crecimiento estacional a diferentes edades de rebrote de 16 ecotipos de *Brachiaria* spp. en Isla, Veracruz. *Agrociencia* 33 (2): 141–148.
- García E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. (4<sup>th</sup> edition). Universidad Nacional Autónoma de México: México, D. F. 217 p.
- Hare DM, Pizarro AE, Phengphet S, Songsiri T, Sutin N. 2015. Evaluation of new hybrid brachiaria lines in Thailand. 1. Forage production and quality. *Tropical Grasslands* 3 (2): 83–93. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(3\)83-93](https://doi.org/10.17138/TGFT(3)83-93)
- Hatfield RD, Rancour DM, Marita JM. 2017. Grass cell walls: A story of cross-linking. *Frontiers in Plant Science* 7: 2056–2070. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02056>
- Jhang SR, Lin YC, Chen KS, Lin SL, Batterman S. 2020. Evaluation of fuel consumption, pollutant emissions and well-to-wheel GHGs assessment from a vehicle operation fueled with bioethanol, gasoline and hydrogen. *Energy* 209 (118436): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118436>
- Karampinis E, Vamvuka D, Sfakiotakis S, Grammelis P, Itskos G, Kakaras E. 2012. Comparative study of combustion properties of five energy crops and Greek lignite. *Energy Fuels* 26 (2): 869–878. <https://doi.org/10.1021/ef2014088>
- Li X, Chapple C. 2010. Understanding lignification: challenges beyond monolignol biosynthesis. *Plant Physiology* 154 (2): 449–452. <https://doi.org/10.1104/pp.110.162842>
- Lima MA, Gomez LD, Steele-King CG, Simister R, Bernardinelli OD, Carvalho MA, Rezende CA, Labate CA, Azevedo ER, McQueen-Mason SJ, Polikarpov I. 2014. Evaluating the composition and processing potential of novel sources of Brazilian biomass for sustainable biorenewables production. *Biotechnology for Biofuels* 7 (10): 1–19. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-10>
- Maia G, Pinho-Costa, K, Costa Severiano E, Epifanio P, Neto J, Ribeiro M, Fernandes P, Guimarães-Silva J, Gonçalves W. 2014. Yield and chemical composition of *Brachiaria* forage grasses in the off season after corn harvest. *American Journal of Plant Sciences* 5 (7): 933–941. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.57106>
- Majumder RJ, Banerjee J, Barnwal J. 2008. Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. *Fuel* 87 (13–14): 3077–3081. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.008>
- Mohammed IY, Abakr YA, Kazi FK, Yusup S, Alshareef I, Chin SA. 2015. Comprehensive characterization of Napier grass as a feedstock for thermochemical conversion. *Energies* 8 (5): 3403–3417. <https://doi.org/10.3390/en8053403>
- Nguku SA, Musimba NKR, Njarui DN, Mwobobia RM. 2016. The chemical composition and nutritive value of *Brachiaria* grass cultivars at katumani dryland research station in south eastern Kenya. *Journal of Advances in Agricultura*. 5 (2): 706–717. <http://dx.doi.org/10.24297/jaa.v5i2.5085>
- Parr. 1999. 1266 Isoperibol Bomb Calorimeter. Operating Instruction Manual. Technical Note No. 367M. Parr Instrument Company. Moline, IL, USA. 1. <https://www.scribd.com/document/149825356/Calorimetre> (Recuperado: abril, 2022).
- Piccolo C, Bezzo F. 2009. A techno-economic comparison between two technologies for bioethanol production from lignocellulose. *Biomass & Bioenergy* 33 (3): 478–491. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.008>
- Ram ND, Salam PA. 2012. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel* 99: 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>
- Rojas-García AR, Torres-Salado N, Maldonado-Peralta, MDLÁ, Sánchez-Santillán P, García-Balbuena A, Mendoza-Pedroza SI, Hernández-Garay A. 2018. Curva de crecimiento y calidad del pasto cobra (*Brachiaria* híbrido br02/1794) a dos intensidades de corte. *Agroproductividad* 11 (5): 34–39.
- Said MSM, Ghani WAWAK, Boon TH, Hussain SA, Ng DKS. 2019. Thermochemical conversion of Napier grass for production of renewable syngas. *Processes* 7 (10): 705. <https://doi.org/10.3390/pr7100705>
- Samson R, Mani S, Boddey R, Sokhansanj S, Quesada D, Urquiaga S, Ho LC. 2005. The potential of C<sub>4</sub> perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24 (5–6): 461–495. <https://doi.org/10.1080/07352680500316508>

- Santiago-Ortega MA, Honorato-Salazar JA, Quero-Carrillo AR, Hernández-Garay A, López-Castañeda C, López-Guerrero I. 2016. Biomasa de *Urochloa brizantha* cv. Toledo como materia prima para la producción de bioetanol. *Agrociencia* 50 (6): 711–726.
- SAS Institute. 2011. SAS/STAT User's Guide. Release 9.3. SAS Institute Inc.: Cary, NC, USA. 564 p.
- Souza-Rodrigues R, de Almeida, MN, Maitan-Alfenas, GP, Ventorim, RZ, Sartori, SR, Visser, ME, Rezende, STD. 2021. *Brachiaria brizantha* grass as a feedstock for ethanol production. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 64 (1): 1-13. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021200397>
- Sun SC, Sun D, Cao XF. 2021. Effect of integrated treatment on enhancing the enzymatic hydrolysis of cocksfoot grass and the structural characteristics of co-produced hemicelluloses. *Biotechnology for Biofuels* 14 (88): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01944-8>
- Van Soest PJ. 1994. Nutritional ecology of the ruminant (2nd Edition); Cornell University Press: Ithaca, NY, USA. 488 p.
- Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74 (10): 3583–3589. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Ventura-Ríos J, Reyes-Vázquez I, García-Salas A, Muñoz-García C, Muro-Reyes A, Maldonado-Peralta MA, Rojas-García A, Cruz-Hernández A. 2019. Rendimiento, perfiles nutrimentales y de fermentación ruminal in vitro de pasto Maralfalfa (*Cenchrus purpureus* Schumach.) Morrone a diferentes frecuencias de corte en clima cálido. *Acta Universitaria* 29 (1):1–11. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2204>
- Ventura-Ríos J, Honorato-Salazar JA, Santiago-Ortega MA, Barrera-Martínez I. 2021a. Biomass and energy characteristics of Maralfalfa grass (*Cenchrus purpureus* Schumach.) Morrone cultivated in warm subhumid climate to produce bioethanol. *Agrociencia* 55 (5): 389–401. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i5.2515>
- Ventura-Ríos J, Santiago-Ortega MA, Barrera-Martínez I, Álvarez-Vázquez P, Carrillo-López P, Honorato-Salazar JA. 2021b. Caracterización del pasto mombaza como materia prima para producir bioetanol. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12 (2): 235–246. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2441>
- Ventura Ríos J, Santiago-Ortega MA, Maldonado-Peralta MA, Álvarez-Vázquez P, Maldonado-Peralta R, Barrera-Martínez I, Wilson-García CY. 2021c. Biomasa de *Urochloa humidicola* como materia prima para producir biocombustible. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44 (4A): 797–804. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4-A.797>
- Ventura-Ríos J, Honorato-Salazar JA, Apolinar-Hidalgo F, Barrera-Martínez I, Aburto-Anell J, Vaquera-Huerta H. 2022. Agronomic characterization of Taiwan grass [*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone] and evaluation of its potential to produce bioethanol in the warm sub-humid climate of Mexico. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* 10 (1): 22–31. [https://doi.org/10.17138/tgft\(10\)22-31](https://doi.org/10.17138/tgft(10)22-31)
- Vogel KP, Casler MD, Dien BS. 2017. Switchgrass biomass composition traits and their effects on its digestion by ruminants and bioconversion to ethanol. *Crop Science* 57(1): 275–281. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.07.0625>
- Wang S, Li W, Alrueyemi I. 2021. On the investigation of effective factors on higher heating value of biodiesel: robust modeling and data assessments. *Bio Med Research International* 2021 (4): 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/4814888>
- Wongwatanapaiboon J, Kangvansaichol K, Burapatana V, Inochanon R, Winayanuwattikun P, Yongvanich T, Chulalaksananukul W. 2012. The potential of cellulosic ethanol production from grasses in Thailand. *BioMed Research International* 2012: 1–10. <https://doi.org/10.1155/2012/303748>
- Zhao YL, Dolat A, Steinberger Y, Wang X, Osman A, Xie G H. 2009. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Research* 111 (1-2): 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.006>

## FRECUENCIA DE CORTE EN PASTO CAYMAN (*Urochloa* HÍBRIDO) EN EL PODER CALORÍFICO EN EL TRÓPICO HÚMEDO MEXICANO

Joel Ventura-Ríos<sup>1</sup>, Adelaido Rafael Rojas-García<sup>2</sup>, Iliana Barrera-Martínez<sup>3</sup>, Alejandro García-Salas<sup>1</sup>, María de los Ángeles Maldonado-Peralta<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C. P. 25315.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia No. 2, Cuajinicuilapa, Guerrero, México. C. P. 41940.

<sup>3</sup> CONACYT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Camino Arenero 1227, El Bajío, Zapopan, Jalisco, México. C. P. 45019.

\* Autor para correspondencia: mmaldonado@uagro.mx

### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la frecuencia de corte en pasto Cayman (*Urochloa* híbrido) en el rendimiento de biomasa, humedad, cenizas, extracto etéreo, fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA), lignina detergente ácida (LDA), proteína cruda (PC), poder calorífico y rendimiento teórico de bioetanol. Se establecieron como tratamientos cuatro frecuencias de corte: 30, 60, 90 y 120 d, dispuestos en un diseño en bloques completamente al azar con tres repeticiones. Los datos se analizaron con GLM (SAS) y las medias fueron comparadas con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). La mayor producción de biomasa (11.9 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), poder calorífico (15.1 MJ kg<sup>-1</sup>) y LDA (5.7 %) se obtuvieron en la frecuencia de corte de 120 d. La concentración de FDN (61.8 %), FDA (43.6 %), celulosa (38.1 %) y producción teórica de bioetanol (218.4 L Mg<sup>-1</sup> MS) fueron estadísticamente diferentes en la frecuencia de corte a 90 d. En cuanto al valor de hemicelulosa (18.7 %) y extracto etéreo (1.8 %), fueron estadísticamente diferentes en la frecuencia de corte de 60 d; mientras que, la PC (9.7 %) y cenizas (11.8 %) mostraron diferencias significativas en la frecuencia de corte de 30 d. De acuerdo con el rendimiento de biomasa y poder calorífico del pasto Cayman, puede ser considerado como potencial material vegetal para producción de etanol celulósico.

**Palabras clave:** biocombustible, cultivo energético, frecuencia de corte, gramínea.

### INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el inminente agotamiento del petróleo, el constante incremento en el precio de los combustibles fósiles y su inequívoca contribución en el calentamiento global de la tierra, ha impulsado la investigación sobre la producción de biocombustibles utilizando forrajes como materia prima.

Un biocombustible se define como un químico de alto poder energético generado a partir de procesos biológicos derivados de biomasa u organismos vivos (Jhang *et al.*, 2020); por esto, se consideran renovables y amigables con el medio ambiente. Además, pueden contribuir a mitigar el problema del calentamiento global y el cambio climático.

**Citation:** Ventura-Ríos J, Rojas-García R, Barrera-Martínez I, García-Salas A, Maldonado-Peralta MA. 2023. Frecuencia de corte en pasto Cayman (*Urochloa* híbrido) en el poder calorífico en el trópico húmedo mexicano.

Agrociencia 57(3): 425-453.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2581>

**Editor in Chief:**  
 Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: August 11, 2022.  
 Approved: January 27, 2023.  
**Published in Agrociencia:**  
 April 20, 2023.

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



Los bioenergéticos líquidos más comunes son el biodiesel y bioetanol (Zhao *et al.*, 2009), los cuales pueden reemplazar a los combustibles fósiles o usarse como aditivos en productos compuestos de hidrocarburos (Sun *et al.*, 2021). En el caso particular del bioetanol, uno de los aspectos más discutidos es la materia prima a partir de la cual será obtenido; de tal forma que, el llamado bioetanol de primera generación es aquel que se obtiene a partir de productos alimenticios como maíz, sorgo y caña de azúcar; sin embargo, esto conlleva el dilema ético de utilizar alimentos para generar energía. El bioetanol de segunda generación se produce a partir de materiales lignocelulósicos evitando usar alimentos.

Los cultivos energéticos se consideran materia prima para bioetanol de segunda generación y dentro de éstos encontramos a pastos y plantas  $C_4$  que tienen como característica una alta eficiencia para convertir la luz solar en biomasa (Ventura-Ríos *et al.*, 2022).

El poder calorífico es el parámetro clave para evaluar la calidad del combustible y energía disponible por unidad de masa (Ram y Salam, 2012) y en pastos puede alcanzar hasta  $20 \text{ kJ kg}^{-1}$  (Sun *et al.*, 2021). La biomasa de los pastos, según Mohammed *et al.* (2015) químicamente está formada por celulosa (34 %), hemicelulosa (20 %), lignina (24 %), proteínas (11.3 %), sílice (1 %) y otros minerales, e incluye también, FDN (75 %) y FDA (45 %; Maia *et al.*, 2014). Los componentes en la pared celular y contenido celular pueden variar según la zona geográfica, etapa fenológica de la planta y tejido celular analizado. Por ejemplo, Bernal-Flores *et al.* (2017) reportan una variabilidad en la concentración de lignina al estudiar diversos tejidos de 30 genotipos de pasto Banderilla [*Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr.] en México. También es importante evaluar la holocelulosa (Santiago-Ortega *et al.*, 2016), carbono fijo, material volátil, humedad y extractivos (Mohammed *et al.*, 2015), para conocer las propiedades físicas y químicas que tienen los pastos. Dada la complejidad de la pared celular de las gramíneas, la biomasa debe ser pretratada para romper los enlaces de lignina y favorecer el proceso de sacarificación hasta en un 95 % (Sun *et al.*, 2021), permitiéndonos obtener  $311.5 \text{ L}$  de bioetanol  $\text{Mg}^{-1}$  de biomasa o  $2967 \text{ L ha}^{-1}$  (Zhao *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2014). En la zona tropical de México se han introducido variedades del género *Urochloa* ( $C_4$ ), usadas en la alimentación animal. En el año 2011, la empresa Papalotla, S. A. de C. V., con sede en México, liberó el híbrido Cayman con cualidades muy particulares para mejorar la producción animal (Hare *et al.*, 2015). Sin embargo, las investigaciones de fisiotecnia vegetal, comportamiento en la pradera y composición química de este pasto son limitados, y para un mejor aprovechamiento, es necesario determinar la edad óptima de rebrote, donde alcanza la mayor producción de biomasa y composición química.

En México, recientemente se han evaluado diferentes cultivares de los géneros *Cenchrus* (Ventura *et al.*, 2021a), *Megathyrsus* (Ventura-Ríos *et al.*, 2021b) y *Urochloa* (Santiago *et al.*, 2016), con la finalidad de conocer su desempeño agronómico, poder calorífico, análisis inmediato y producción de azúcares fermentables para la obtención de etanol celulósico. Por ello, la hipótesis de esta investigación fue probar si la edad

de rebrote influye en la concentración de energía del pasto Cayman. El objetivo del presente estudio fue evaluar a qué edad de rebrote de cuatro frecuencias de corte (30, 60, 90 y 120 d), se obtiene la mayor cantidad y calidad forrajera y su influencia en el poder calorífico, producción de biomasa, composición química y rendimiento teórico de bioetanol del pasto Cayman (*Urochloa* híbrido cv. CIAT BR02/1752), en condiciones de temporal y fertilización en el trópico húmedo mexicano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La investigación se realizó en el Campo Experimental “Papaloapan” del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícola y Pecuaria (INIFAP), ubicado a 18° 06' LN y 95° 31' LO, a 65 m de altitud, en Cd. Isla, Veracruz, México. El clima se clasifica como un Aw, caliente subhúmedo con 80 % de la lluvia estacional en verano; en promedio de 40 años la precipitación anual y temperatura fueron de 1142 mm y 25.8 °C, respectivamente (García, 2004). Los suelos son vertisoles con pH de 5.4, textura arcillosa y la materia orgánica es de 2.6 % (Enríquez y Romero, 1999).

### Manejo de la pradera y tratamientos

La siembra del pasto Cayman (*Urochloa* híbrido cv. CIAT BR02/1752) se realizó en julio 22 del 2017 a razón de 10 kg ha<sup>-1</sup> de semilla pura viable, la cual fue proporcionada por Papalotla S. A. de C. V. de México. El suelo se preparó con barbecho y dos pasos de rastra y se surcó a 0.50 m de separación entre sí. Las parcelas experimentales fueron establecidas en 5 m x 16 m, con tres repeticiones. Se usó fertilizante granulado [120-80-00 kg ha<sup>-1</sup>; N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O], a los 43 y 112 d después de la siembra de manera manual. Previo a los muestreos se hizo un corte de uniformidad con machetes a una altura de 15 cm sobre el nivel del suelo. Los muestreos y fertilización se hicieron por la mañana durante todo el experimento. El experimento concluyó en julio 24 de 2018. Como tratamientos se establecieron cuatro frecuencias de corte: 30, 60, 90 y 120 d de intervalo, realizadas durante 365 d.

### Variables evaluadas

Las determinaciones de materia seca (MS) se realizaron en el laboratorio para Materiales Lignocelulósicos de INIFAP en San Martinito, Puebla, México; a excepción de la concentración de nitrógeno (N), que se realizó en el laboratorio y Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo, en Montecillo, Estado de México, México. Las variables evaluadas fueron rendimiento de biomasa, materia seca, nitrógeno (N), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), celulosa, hemicelulosa, lignina detergente ácido (LDA), extracto etéreo, cenizas, poder calorífico, humedad y rendimiento teórico de bioetanol.

### Rendimiento de biomasa

La producción de biomasa se determinó en intervalos de 30, 60, 90 y 120 d después del corte de uniformidad durante un año. En cada parcela, en cada fecha de muestreo, se lanzó un marco de metal de 1 m<sup>2</sup> al azar en cinco ocasiones en cada unidad experimental y se cortó a 20 cm de altura de forraje residual. La biomasa cosechada en verde, se pesó en una balanza Ohaus de precisión y previamente calibrada con capacidad de 6.2 kg±0.1 g (GT-4000®; TEquipment, Parsippany, NJ, EE. UU.), después, una submuestra fue pesada e inmediatamente colocada en bolsas de papel previamente rotulados en una estufa de convección forzada (FE-243A; Felisa, México, Méx.) a 55 °C hasta peso constante y se pesó.

### Preparación de las muestras para análisis

Las muestras secas fueron pulverizadas en un molino Wiley® (Arthur H. Tomas, Filadelfia, PA, EE. UU.) y fueron pasadas por tamices No. 40 (0.42 - 1.00 mm) y No. 60 (0.25 - 0.42 mm).

### Análisis químico

Las muestras fueron incineradas durante 2 h a 600 °C en una mufla (Thermo Scientific, BF 51842, Fowlerville, MI, EE. UU.) para obtener la concentración de materia orgánica y cenizas según la Norma ASTM D 1102-84. La concentración de proteína cruda (PC) se determinó por el método semi-micro Kjeldahl (N x 6.25), mientras el extracto etéreo en extractor Soxhlet (PYREX® Corning Life Sciences, 3840-L, Corning, NY, EE. UU.). Las concentraciones de fibra detergente neutro, fibra detergente ácido y lignina detergente ácido, fueron obtenidas secuencialmente en el analizador de fibras ANKOM<sup>2000</sup>® (Ankom Technology, Fairport, NY, EE. UU.), mediante el uso de bolsas filtro Ankom® F57 con un tamaño de poro de 30 µm. La FDN se determinó con α-amilasa (ANKOM Technology<sup>2000</sup>®) termo estable para solubilizar azúcares, el almidón y las pectinas y sulfito de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) para remover el almidón y el nitrógeno (Van Soest *et al.*, 1991). La celulosa (CL) y hemicelulosa (HC) fueron calculadas mediante la siguiente fórmula: CL = FDA - LDA mientras que HC = FDN - FDA, respectivamente.

### Poder calorífico

El poder calorífico se determinó en un calorímetro de bomba adiabática (Isoperibol, Parr 1266; Parr Instrument Company, IL, E. U.) de acuerdo con la norma ASTM (E711) y a las instrucciones de operación del calorímetro (Parr, 1999) a 30 ± 0.5 °C, con pastillas comprimidas de 1 g máximo. Paralelamente, el contenido de humedad se determinó en una termobalanza Ohaus (MB45®; TEquipment, Parsippany, NJ, EE. UU.) previamente calibrada. Para determinar esta variable se utilizaron muestras molidas y pasadas por tamices No. 60 (0.25 - 0.42 mm), con cinco determinaciones para cada muestra, y 15 repeticiones para cada FC.

### Rendimiento teórico de bioetanol

El rendimiento teórico de bioetanol (RTB) (ecuación 3) se determinó con las fórmulas de Badger (2002) y Dien (2010). Las fórmulas incluyen reacciones de hidrólisis, químicas y estequiométricas de transformación de celulosa (ecuación 1) y hemicelulosa (ecuación 2) en etanol.

Celulosa

$$RTBC - C * C_{g/c} * Ecc * Ret * Efg * Det \quad (1)$$

Hemicelulosa

$$RTBH - H * H_{x/h} * Ech * Ret * Efx * Det \quad (2)$$

Total

$$RTB - RTBC + RTBH \quad (3)$$

donde  $RTB$ :  $L Mg^{-1} MS$ ,  $C$ :  $kg_{celulosa} Mg^{-1} biomasa$ ;  $H$ :  $kg_{hemicelulosa} Mg^{-1} biomasa$ ;  $C_{g/c}$ : concentración de glucosa  $1.111 (kg_{glucosa}/kg_{celulosa})$ ;  $H_{x/h}$ : concentración de xilosa  $1.136 (kg_{xilosa}/kg_{hemicelulosa})$ ;  $Ecc$ : eficiencia de conversión de la celulosa (0.76);  $Ech$ : eficiencia de conversión de las hemicelulosa (0.90);  $Ret$ : rendimiento estequiométrico de etanol ( $0.511 kg_{etanol}/kg_{glucosa}$ ;  $0.511 kg_{etanol}/kg_{xilosa}$ );  $E_{fg}$ : eficiencia fermentativa de glucosa (0.75);  $E_{fx}$ : eficiencia fermentativa de xilosa (0.50);  $D_{et}$ : densidad de etanol ( $0.78 Mg m^{-3}$ ).

Además, la cantidad teórica anual de bioetanol (L) que produce una ha de pasto Cayman se calculó para cada FC. El procedimiento consistió en multiplicar el rendimiento teórico de bioetanol por unidad de biomasa, por el rendimiento anual de biomasa de acuerdo con la metodología de Badger (2002) y Dien (2010).

### Diseño experimental y análisis estadístico

Los datos se analizaron como un diseño completamente al azar, donde se consideró la frecuencia de corte del pasto Cayman como tratamientos (30, 60, 90 y 120 d) con tres repeticiones por tratamiento. Se realizó un análisis de varianza (Anova) para identificar el efecto de la frecuencia de corte en las variables de respuesta mediante el uso del procedimiento GLM/SAS y las medias de tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) utilizando SAS para Windows versión 9.3 (SAS, 2011).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Producción de biomasa

La producción de biomasa anual se incrementó a medida que aumentó la FC (Cuadro 1;  $p \leq 0.05$ ), donde la mayor producción se observó cada 120 d ( $11.9 Mg MS ha^{-1} año^{-1}$ ). El corte de cada 120 d superó en 20, 40 y 67 % a las FC de 90, 60 y 30 d, respectivamente. Por lo anterior, en pasto Toledo (*Urochloa brizantha*) Santiago *et al.* (2016), reportaron  $11.1 Mg ha^{-1} año^{-1}$  cada 30 d, lo cual superó en  $4 Mg ha^{-1} año^{-1}$  a lo encontrado en

**Cuadro 1.** Producción de biomasa y energía del pasto Cayman *Urochloa* híbrido cv. CIAT BR02/1752 en cuatro frecuencias de corte en Cd. Isla, Veracruz, México.

Frecuencia de corte (días)	Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Poder calorífico (MJ kg <sup>-1</sup> )	Energía (GJ ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Humedad (%)
30	7.1d	14.9b	105.6d	8.4a
60	8.4c	14.8b	126.1c	8.4a
90	9.9b	14.6b	145.2b	8.7a
120	11.9a	15.1a	180.6a	8.0b
Media	9.35	14.9	139.4	8.4
EE	1.03	0.10	15.9	0.14

EE: Error estándar. Letras diferentes muestran diferencias entre cortes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

el presente estudio. Así mismo, Rojas-García *et al.* (2018) condujeron un estudio en el trópico de México durante la época de seca en condiciones de temporal y sin fertilización, los resultados obtenidos para el pasto Cobra (*Urochloa* híbrido BR02/1794) fue de 2.5 Mg ha<sup>-1</sup>, lo cual fue menor a lo obtenido en la presente investigación. Por tanto, las condiciones de Cd. Isla, Veracruz, son mejores para el desarrollo del cultivo, aunado a mayor precipitación (> 300 mm).

Existen otras variedades de pastos tropicales que superan los 12 Mg de biomasa, como es el pasto Taiwán (*Cenchrus purpureus*; Ventura-Ríos *et al.*, 2021a); sin embargo, la composición química de los pastos presenta cambios en la pared y contenido celular a medida que avanza su madurez fisiológica, por ello, es importante reportar el contenido energético y su potencial como biocombustible en función del periodo de corte.

#### Poder calorífico y contenido de humedad

La FC cada 120 d mostró mayor poder calorífico ( $p \leq 0.05$ ; Cuadro 1) sobre las demás FC, debido a que la planta en esa FC tuvo menor contenido de humedad ( $p \leq 0.05$ ); la FC de 30, 60 y 90 d fueron similares ( $p \geq 0.05$ ). La mayor producción de energía por ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> correspondió a la FC de 120 d (180.6 GJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) la cual fue diferente ( $p \leq 0.05$ ) a las demás FC, superando en 71 % (equivalente a 75 GJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) a la FC de 30 d; 43 % (equivalente a 54.5 GJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) a la FC de 60 d y en 24 % (equivalente a 35.4 GJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) a la FC de 90 d (Cuadro 1). La biomasa de pastos es de gran interés debido a su neutralidad de carbono, su potencial térmico para la obtención de energía, además su composición y estructura química favorecen la concentración de energía por unidad de biomasa (Wang *et al.*, 2021). Es importante identificar el poder calorífico de la biomasa de los pastos para evaluar su potencial como materia prima para producir bioenergía y también determinar el contenido de humedad de la biomasa, porque ésta disminuye la expresión energética dentro de la biomasa (Majumder *et al.*, 2008).

El contenido de humedad fue similar a 30, 60 y 90 d ( $p > 0.05$ ; Cuadro 1) y solo se observó diferencia a 120 d ( $p \leq 0.05$ ) que mostró el menor contenido de humedad. El poder calorífico en el presente experimento se encontró en un rango de 14.9 a 15.1 MJ kg<sup>-1</sup>, el

cual fue menor a lo reportado por Said *et al.* (2019) quienes encontraron 16.7 MJ kg<sup>-1</sup> en pasto Napier (*C. purpureus*), así mismo, Karampinis *et al.* (2012) reportaron 18.7 MJ kg<sup>-1</sup> en miscanthus (*Miscanthus giganteus*). El promedio obtenido en este experimento fue de 14.9 MJ kg<sup>-1</sup>, el cual es menor en 1.6 y 3.4 MJ kg<sup>-1</sup> al promedio reportado por Santiago *et al.* (2016) y Ventura-Ríos *et al.* (2021a) quienes encontraron 16.5 y 18.3 MJ kg<sup>-1</sup> en pasto Toledo (*U. brizantha*) y Maralfalfa (*C. purpureus*), respectivamente, bajo condiciones de clima cálido subhúmedo en Cd. Isla, Veracruz, México, mediante fertilización con la siguiente fórmula: 120-80-00 kg ha<sup>-1</sup>.

Por otro lado, los pastos del género *Urochloa* (*C.*), tienen una alta eficiencia para convertir la luz solar en biomasa comparada con los árboles, lo que permite alcanzar rendimientos de biomasa que superan los 28 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> bajo sistemas de fertilización (Santiago *et al.*, 2016). Además, su poder calorífico puede superar los 20 kJ kg<sup>-1</sup> (Sun *et al.*, 2021), cualidad favorable para considerar a la biomasa como una materia prima adecuada para producir energía renovable, comparada con maderas de coníferas y latifoliadas que su poder calorífico puede ser de 20.5 y 20.2 MJ kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Ram y Salam, 2012).

### Proteína cruda

La mayor concentración de proteína cruda se encontró a los 30 d, ( $p \leq 0.05$ ; Cuadro 2). A medida que se incrementa la FC, la concentración de N en la planta disminuye, como sucedió en este estudio, al pasar de 30 a 90 d la concentración de proteína disminuyó en 44.3 % y de 30 a 120 d en 55 %. En otros estudios realizados en zonas tropicales de Goiás, Brasil, con la adición de fertilizantes a base de: 200 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 30 kg ha<sup>-1</sup> N, 60 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O, 2 kg ha<sup>-1</sup> boro, 0.4 kg ha<sup>-1</sup> molibdeno, utilizando como fuentes: superfosfato simple, cloruro de potasio, ácido bórico y molibdato de sodio, Maia *et al.* (2014) reportaron valores de 15 % en *U. brizantha* cv. Piata y Xaraés y 7.4 % en el cv. MG4. Normalmente, la concentración de N en la planta tiende a disminuir a medida que avanza su madurez fisiológica; no obstante, este elemento está altamente relacionado con la adición de fertilizantes, precipitación y radiación solar.

**Cuadro 2.** Composición química del pasto "Cayman" *Urochloa* híbrido cv. CIAT BR02/1752 en cuatro frecuencias de corte en Isla Veracruz, México.

Frecuencia de corte (días)	Componente (%)					
	PC	FDN	FDA	LDA	Ext. E.	Cenizas
30	9.7a	52.9d	35.2d	4.4d	1.4c	11.8a
60	6.4b	55.7c	37.0c	4.9c	1.8a	9.6b
90	5.4c	61.8a	43.6a	5.4b	1.2d	8.6c
120	4.3d	61.5b	43.2b	5.7a	1.5b	7.5d
Mean	6.5	58.0	39.7	5.1	1.5	9.4
EE	1.16	2.19	2.14	0.28	0.12	0.91

PC: proteína cruda, FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida. Ext. E.: Extracto etéreo, EE: Error estándar. Letras diferentes por columna muestran diferencias entre cortes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

La concentración alta de proteína no es deseable en la biomasa con fines bioenergéticos, por lo que es importante cuantificarla. A mayor cantidad de nitrógeno menor será la bioconversión de azúcares totales (holocelulosa) a bioetanol debido a que el nitrógeno presente en la pared celular tiene la capacidad de formar puentes con el ácido ferúlico y aumentan la resistencia e insolubilidad de toda la estructura (Bidlack *et al.*, 1992). La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) incorporó el término biorrefinería, donde define a la biomasa como un compuesto de origen biológico para producir a partir de esta bioenergía y, por otro lado, aprovechar el contenido de fibra cruda, proteína cruda, y lignina para obtener alimentos, productos químicos y materiales (Amore *et al.*, 2016).

#### **Fibra detergente neutro (FDN) y Fibra detergente ácida (FDA)**

La concentración de FDN fue mayor a 90 d ( $p \leq 0.05$ ; Cuadro 2) y superó en 17, 11 y 0.5 % a la FC de 30, 60 y 120 d, respectivamente. La concentración mayor de FDA se encontró a 90 d y fue diferente a las demás frecuencias de corte ( $p \leq 0.05$ ), superando en 24, 18 y 1 % a la FC de 30, 60 y 120 d, respectivamente. Por lo anterior, la concentración de FDN se incrementó en 17 % al pasar del corte de 30 a 90 d, así mismo ocurrió con el pasto Maralfalfa (*C. purpureus*), donde se observó un aumento del 12 % a medida que incrementó la FC de 30 a 120 d de cosecha (Ventura-Ríos *et al.*, 2019). Además, Maia *et al.* (2014) reportaron valores de FDN de 63.7 y 75.2 % en *U. brizantha* cv. Piata y MG4, respectivamente, lo que indica que la concentración de FDN aumenta a medida que la madurez fisiológica en la planta avanza, dado que la FDN evalúa la concentración de celulosa, hemicelulosa y lignina. Por otra parte, al evaluar la curva de crecimiento del pasto Cobra (*Urochloa híbrido* BR02/1794), Rojas-García *et al.* (2018) reportaron a 63 d de rebrote concentraciones de 79 y 44.7 % para FDN y FDA, respectivamente, los cuales son similares a lo encontrado en el presente experimento. Existe poca información del uso de la fibra para fines bioenergéticos, su utilidad está muy relacionada con la industria del papel o directamente en cuestiones de combustión remplazando al carbón (Samson *et al.*, 2005) o para la alimentación animal (Maia *et al.*, 2014).

#### **Lignina detergente ácido**

A medida que se incrementó la edad de las plantas la concentración de lignina aumentó, y fue mayor a 120 d la cual, superó en 29, 16 y 5.5 % a las FC de 30, 60 y 90 d, respectivamente ( $p \leq 0.05$ ; Cuadro 2). En otras investigaciones, se han encontrado valores muy similares a lo obtenido en el presente experimento, por ejemplo, Wongwatanapaiboon *et al.* (2012), reportaron concentraciones de 5.8, 5.0 y 4.7 % para pasto Atratum (*Paspalum atratum*), Pangola (*Digitaria decumbens*) y Ruzi (*Urochloa ruziziensis*), respectivamente.

Las altas concentraciones de LDA en la biomasa como materia prima para biocombustible no son deseables. La lignina es un polímero de alta complejidad formada por unidades de fenil-propano (alcoholes *p*-coumaryl, coniferyl y sinapil), y se encuentra dentro de las matrices de la pared celular en los pastos. La biosíntesis de la lignina a

medida que la planta avanza en su estado fenológico, se va modificando en su concentración, estructura y sus enlaces ligados a las hexosas (glucosa) y pentosas (hemicelulosas) (Li y Chapple, 2010). La lignina al ser un material hidrofóbico, el agua contenida en la matriz de la pared celular es expulsada permitiendo en la planta flexibilidad, permeabilidad y modificando su rigidez, de tal modo que los pastos durante su crecimiento y desarrollo dependiendo del clima y factores ambientales donde se desarrollan tienden a modificar la concentración de este compuesto en su estructura (Hatfield *et al.*, 2017), por ello, es importante contabilizar dicho compuesto en la biomasa, dado que a una mayor concentración de lignina, se verá limitada la eficiencia del proceso de sacarificación y por ende la obtención de azúcares fermentables (glucosa, fructosa, sacarosa, manosa, xilosa, etc.), limitando la calidad de la biomasa del forraje (Van Soest, 1994). Por esta razón es deseable obtener materias primas con bajo contenido de lignina (Mohammed *et al.*, 2015; Vogel *et al.*, 2017).

#### Extracto etéreo

La mayor concentración de extracto etéreo se encontró a 60 d, el cual fue diferente ( $p \leq 0.05$ ) y superó a la FC de 90, 30 y 120 d en 50, 28 y 20 % respectivamente (Cuadro 2). En investigaciones previas, Ventura-Ríos *et al.* (2019) reportaron 1.8 % de extracto etéreo en pasto Maralfalfa (*C. purpureus*), cuando fue cortado a 90 d; sin embargo, la concentración de extractos puede ser superior al 10 % (Mohammed *et al.*, 2015; Ventura-Ríos *et al.*, 2021a). El extracto etéreo en los pastos presenta una composición heterogénea, básicamente de lípidos (galactolípidos, triglicéridos y fosfolípidos) y otros compuestos no polares que pueden ser extraídos por solventes, tales como: fosfátidos, esteroides, pigmentos, vitaminas liposolubles y ceras (Van Soest, 1994).

Los compuestos que forman al extracto etéreo no pueden ser transformados a etanol, por lo que la biomasa lignocelulósica con mayor concentración de extractivos causará rendimiento menor de etanol. La cuantificación del total de extractos es relevante en los análisis físicos y químicos, dado que este compuesto tiene la capacidad de limitar la expresión bioenergética y alterar los resultados químicos de la biomasa.

#### Cenizas

La mayor concentración de cenizas se encontró a 30 d la cual fue diferente a las demás FC ( $p \leq 0.05$ ; Cuadro 2), superando en 23, 37 y 57 % a las FC de 60, 90 y 120 d, respectivamente. La concentración de cenizas en la planta se presentó en mayor concentración en etapas tempranas; sin embargo, los materiales inorgánicos no son deseables en evaluaciones bioenergéticas debido a que interfieren en los procesos de combustión por lo que es necesario optimizar los procesos de operación y reducir los costos asociados con la producción de residuos en las calderas o calentadores. Los valores reportados en otras evaluaciones con gramíneas son similares al presente estudio, por ejemplo, 7 % en *U. brizantha* (Santiago *et al.*, 2016), 8.5 % en *U. decumbens*, 9.5 % en *Chloris gayana* y 10.6 % en *U. brizantha* cv. Xaraés (Nguku *et al.*, 2016).

El material inorgánico en pastos es variable en la concentración de cenizas entre especies, normalmente se puede encontrar hasta en un 12 % o más en plantas herbáceas y

residuos agrícolas en etapas tempranas del crecimiento. Sin embargo, este compuesto no aporta ningún valor energético y de lo contrario puede limitar la expresión energética de la biomasa (Ram y Salam, 2012).

### Celulosa

La concentración de celulosa fue mayor a 90 d la cual fue diferente ( $p \leq 0.05$ ; Cuadro 3), y superó en 24, 18 y 2 % a las FC de 30, 60 y 120 d respectivamente. En investigaciones recientes, Santiago *et al.* (2016) en pasto *U. brizantha* reportaron en promedio 42.1 % de celulosa, el cual es superior en 21 % a lo obtenido en este experimento en la FC de 90 d. Sin embargo, Wongwatanapaiboon *et al.* (2012) en pasto Pangola (*D. decumbens*) reportaron valores de 33 %, en Ruzi (*U. ruziziensis*) 33.6 % y en pasto Elefante (*Pennisetum purpureum*) 35.2 % lo cual, fue similar a los valores encontrados en nuestro estudio en la FC de 60 d.

**Cuadro 3.** Carbohidratos estructurales del pasto "Cayman" *Urochloa* híbrido cv. CIAT BR02/1752 en cuatro frecuencias de corte.

Frecuencia de corte (días)	Componente			
	Celulosa		Hemicelulosa	
	(%)	(Mg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	(%)	(Mg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )
30	30.8d	2.1d	17.7d	1.2d
60	32.1c	2.7c	18.7a	1.5c
90	38.1a	3.7b	18.1c	1.7b
120	37.4b	4.4a	18.2b	2.1a
Media	34.6	3.2	18.2	1.7
EE	1.84	0.5	0.20	0.19

EE: Error estándar. Letras diferentes muestran diferencias entre cortes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

La composición química de las gramíneas se modifica a medida que avanza la edad en la planta; sin embargo, es necesario conocer el contenido de azúcares en las diferentes edades de la planta para maximizar el contenido de glucosa y xilosa por gramo de muestra y por unidad de área. Considerando los rendimientos de biomasa por ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, los cálculos indicaron que los cortes de cada 120 d (4.4 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), produjeron mayor concentración de celulosa ( $p \leq 0.05$ ), superando en 109, 63 y 19 % a las FC de 30, 60 y 90 d, respectivamente (Cuadro 3).

Para producir bioetanol por vía fermentativa se necesitan azúcares fermentables (principalmente monosacáridos) como fuente de carbono para consumo de los microorganismos involucrados en este bioproceso. El bioetanol llamado de segunda generación utiliza como materia prima residuos agroindustriales o cultivos energéticos. Los azúcares fermentables, en estas materias primas se obtienen a partir de un proceso que tiene como primer paso una deslignificación (pretratamientos químicos, físicos, mecánicos, biológicos o combinaciones de estos) para después hacer una hidrólisis

enzimática de la celulosa y hemicelulosa. De aquí la importancia de contar con materias primas con un alto contenido de estos polímeros (Barrera *et al.*, 2016).

### Hemicelulosa

La mayor concentración de hemicelulosa se encontró a 60 d y superó en 5.6, 3.3 y 3 % a las FC de 30, 90 y 120 d, respectivamente ( $p \leq 0.05$ ; Cuadro 3). En las gramíneas, la hemicelulosa constituye del 11 al 34 % de la biomasa y en trabajos previos se han reportado concentraciones similares al presente experimento, por ejemplo, 18.7 % en pasto Napier (*P. purpureum*; Mohammed *et al.*, 2015) y concentraciones de 15 a 23 % en pasto Mombaza (*P. maximum*) (Ventura-Ríos *et al.*, 2021b). La hemicelulosa está conformada por azúcares de seis y cinco carbonos, hexosas y pentosas, respectivamente. Sin embargo, los microorganismos utilizados comúnmente para producir etanol no tienen la capacidad metabólica para asimilar azúcares de cinco carbonos, xilosa y arabinosa en el caso de la hemicelulosa (Barrera *et al.*, 2016). Por esta razón, si bien a partir de la hemicelulosa se pueden obtener monosacáridos o disacáridos, el aprovechamiento de éstos para producir etanol dependerá del microorganismo utilizado.

### Rendimiento teórico a bioetanol

Con base en los cálculos propuestos por Badger (2002) y Dien (2010), el mayor rendimiento teórico de bioetanol por Mg de MS, calculado con base en las concentraciones de glucosa y xilosas, se encontró en 90 d y superó en 17, 12 y 1.2 % a las FC de 30, 60, y 120 d, respectivamente ( $p \leq 0.05$ ; Cuadro 4). El rendimiento anual de bioetanol se relaciona directamente con la producción de biomasa cosechada y en este experimento el mayor rendimiento teórico calculado se encontró a 120 d ( $p \leq 0.05$ ), el cual fue superior a la FC de 30, 60 y 90 d en 94, 55 y 18.7 %, respectivamente.

**Cuadro 4.** Rendimiento teórico de bioetanol del pasto "Cayman" *Urochloa* híbrido cv. CIAT BR02/1752 en cuatro frecuencias de corte.

Frecuencia de corte (días)	Producción teórica de bioetanol	
	(L Mg <sup>-1</sup> MS)	(L ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
30	186.8d	1326.7d
60	195.5c	1660.9c
90	218.4a	2166.1b
120	215.8b	2572.5a
Media	204.1	1931.5
EE	7.7	274.6

EE: Error estándar. Letras diferentes muestran diferencias entre cortes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En estudios conducidos en México y otras partes del mundo en condiciones de trópico, se han reportado los siguientes valores, por ejemplo, en pastos del género *U. brizantha* Santiago *et al.* (2016) reportaron 262.6 a 281.3 L Mg<sup>-1</sup> MS, mientras que Lima *et*

*al.* (2014) reportaron 311 L Mg<sup>-1</sup> MS, los cuales superan a lo encontrado en el presente experimento. Por otro lado, Ventura-Ríos *et al.* (2021c) reportaron 227.2 L Mg<sup>-1</sup> MS en pasto Humidicola (*Urochloa humidicola*) el cual es similar a lo encontrado en el presente estudio. En otros estudios evaluando árboles se han reportado los siguientes valores, por ejemplo, Piccolo y Bezzo (2009) reportaron 284 L Mg<sup>-1</sup> MS en arbóreas latifoliadas el cual es superior en 39 % (equivalente a 80 L Mg<sup>-1</sup> MS) al promedio obtenido en este experimento, no obstante, comparando las fuentes madereras de coníferas y latifoliadas, los pastos tropicales (C<sub>4</sub>) son más eficientes en transformar la luz solar en biomasa y proporcionar mayor cantidad de azúcares por unidad de área y tiempo (Zhao *et al.*, 2009; Ventura-Ríos *et al.*, 2022). Por otro lado, es importante considerar que existen diversos factores que influyen en el rendimiento de la producción de bioetanol, por ejemplo, el tipo de pretratamiento y sus condiciones, la presencia de inhibidores que afecten el crecimiento y capacidad metabólica de los microorganismos, el rendimiento de la sacarificación enzimática y de la capacidad fermentativa del microorganismo para producir bioetanol (Souza-Rodrigues *et al.*, 2021). Además de éstos, la materia prima de la cual se partirá para la obtención de bioetanol es de suma importancia ya que su origen, composición química e incluso la morfología, determinará, en gran medida, la eficiencia del pretratamiento y sacarificación y por tanto de la fermentación (Brito *et al.*, 2003).

La diferencia en el rendimiento teórico de bioetanol de segunda generación, básicamente depende del contenido de azúcares totales, y otros compuestos químicos, como furfural e hidroximetilfurfural que alteran la eficiencia de conversión de azúcares totales en azúcares fermentables (glucosa, fructosa, sacarosa, manosa y xilosa), así mismo, considerar que la biomasa lignocelulósica sufre cambios en su estructura por la época de corte, etapa fisiológica y variedades de plantas (Barrera *et al.*, 2016). Al respecto, Wongwatanapaiboon *et al.* (2012), reportaron 2561 L ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en pasto Elefante (*P. purpureum*) los cuales son inferiores en 11 L ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a lo encontrado cada 120 d. En otros estudios conducidos en el trópico de México, Ventura-Ríos *et al.* (2022) reportaron rendimientos de 2400 a 7936 L ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en pasto Taiwán (*Cenchrus purpureus*) y fue mayor al de este estudio en 55.2 a 208.5 % respectivamente, lo cual se debe a producción mayor de biomasa que producen estos pastos del género *Cenchrus* y a la composición química que poseen en su estructura celular.

Por último, en condiciones de trópico, las gramíneas C<sub>4</sub> producen rendimientos de biomasa que superan los 10 Mg ha<sup>-1</sup>, y son rendimientos aceptables de bioetanol celulósico para reemplazar parcialmente a productos compuestos a base de hidrocarburos; por otro lado, los pastos tropicales son una alternativa en la producción de bioetanol de segunda generación por su capacidad de rebrote, su concentración de azúcares en sus diferentes etapas fisiológicas, y la inversión financiera para su establecimiento y manejo.

## CONCLUSIONES

La producción de biomasa del pasto Cayman *Urochloa* híbrido cv. CIAT BR02/1752 aumenta a mayor edad de las plantas. La concentración de lignina y carbohidratos

estructurales en la planta se modifican con la madurez fisiológica de la planta y los días de corte, tal como lo indican los resultados de este estudio en donde las mayores concentraciones de lignina, celulosa y hemicelulosa se encontraron a los 120, 90 y 60 d, respectivamente. Los valores máximos de biomasa y de poder calórico se alcanzan con la FC de 120 días, lo cual impacta positivamente en la producción de bioetanol por hectárea por año. Los resultados del rendimiento de materia seca y las características químicas de la biomasa indican que el pasto Cayman *Urochloa* híbrido cv. CIAT BR02/1752 es una materia prima con potencial para la producción de bioetanol de segunda generación en condiciones tropicales.

### REFERENCIAS

- Amore A, Ciesielski PN, Lin CY, Salvachúa D, Nogué VS. 2016. Development of lignocellulosic biorefinery technologies: Recent advances and current challenges. *Australian Journal of Chemistry* 69 (11): 1201–1218. <https://doi.org/10.1071/CH16022>
- Badger PC. 2002. Ethanol from cellulose: a general review. *Trends in new crops and new uses*. In: Janick J, Whipkey A (eds.). *Proceedings of the Fifth National Symposium: Atlanta, Georgia, USA*. pp. 17–21.
- Barrera I, Amezcua-Allieri MA, Estupiñan L, Martínez T, Aburto J. 2016. Technical and economical evaluation of bioethanol production from lignocellulosic residues in Mexico: Case of sugarcane and blue agave bagasses. *Chemical Engineering Research and Design* 107: 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.015>
- Bernal-Flores A, Quero-Carrillo AR, Zavaleta-Mancera HA, Pérez-Rodríguez P, Valdez-Carrasco J, Ortega-Cerrilla ME. 2017. Atributos histológicos relacionados con digestibilidad en *Bouteloua curtipendula* (MICHX.) TORR. de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40 (3): 299–308. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.3.299-308>
- Bidlack J, Malone M, Benson R. 1992. Molecular structure and component integration of secondary cell walls in plants. *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science* 72: 51–56.
- Brito, C. J. F., Rodella, R. A., Deschamps, F. C. 2003. Perfil químico da parede celular e suas implicações na digestibilidade de *Brachiaria brizantha* e *Brachiaria humidicola*. *Revista Brasileira de Zootecnia* 32 (6): 1835–1844. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982003000800005>
- Dien BS. 2010. Mass balances and analytical methods for biomass pre-treatment experiments. In: Vertès AA, Qureshi N, Blaschek H, Yukawa H. (eds.). *Biomass to biofuels: strategies for global industries*. Wiley: Chichester, United Kingdom. pp. 213–231. <https://doi.org/10.1002/9780470750025.ch11>
- Enríquez QJF, Romero MJ. 1999. Tasa de crecimiento estacional a diferentes edades de rebrote de 16 ecotipos de *Brachiaria* spp. en Isla, Veracruz. *Agrociencia* 33 (2): 141–148.
- García E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. (4<sup>ta</sup> edition). Universidad Nacional Autónoma de México: México, D. F. 217 p.
- Hare DM, Pizarro AE, Phengphet S, Songsiri T, Sutin N. 2015. Evaluation of new hybrid brachiaria lines in Thailand. 1. Forage production and quality. *Tropical Grasslands* 3 (2): 83–93. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(3\)83-93](https://doi.org/10.17138/TGFT(3)83-93)
- Hatfield RD, Rancour DM, Marita JM. 2017. Grass cell walls: A story of cross-linking. *Frontiers in Plant Science* 7: 2056–2070. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02056>
- Jhang SR, Lin YC, Chen KS, Lin SL, Batterman S. 2020. Evaluation of fuel consumption, pollutant emissions and well-to-wheel GHGs assessment from a vehicle operation fueled with bioethanol, gasoline and hydrogen. *Energy* 209 (118436): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118436>
- Karampinis E, Vamvuka D, Sfakiotakis S, Grammelis P, Itkos G, Kakaras E. 2012. Comparative study of combustion properties of five energy crops and Greek lignite. *Energy Fuels* 26 (2): 869–878. <https://doi.org/10.1021/ef2014088>
- Li X, Chapple C. 2010. Understanding lignification: challenges beyond monolignol biosynthesis. *Plant Physiology* 154 (2): 449–452. <https://doi.org/10.1104/pp.110.162842>

- Lima MA, Gomez LD, Steele-King CG, Simister R, Bernardinelli OD, Carvalho MA, Rezende CA, Labate CA, Azevedo ER, McQueen-Mason SJ, Polikarpov I. 2014. Evaluating the composition and processing potential of novel sources of Brazilian biomass for sustainable bio-renewables production. *Biotechnology for Biofuels* 7 (10): 1–19. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-10>
- Maia G, Pinho-Costa, K, Costa Severiano E, Epifanio P, Neto J, Ribeiro M, Fernandes P, Guimarães-Silva J, Gonçalves W. 2014. Yield and chemical composition of *Brachiaria* forage grasses in the off season after corn harvest. *American Journal of Plant Sciences* 5 (7): 933–941. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.57106>
- Majumder RJ, Banerjee J, Barnwal J. 2008. Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. *Fuel* 87 (13–14): 3077–3081. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.008>
- Mohammed IY, Abakr YA, Kazi FK, Yusup S, Alshareef I, Chin SA. 2015. Comprehensive characterization of Napier grass as a feedstock for thermochemical conversion. *Energies* 8 (5): 3403–3417. <https://doi.org/10.3390/en8053403>
- Nguku SA, Musimba NKR, Njarui DN, Mwobobia RM. 2016. The chemical composition and nutritive value of *Brachiaria* grass cultivars at katumani dryland research station in south eastern Kenya. *Journal of Advances in Agricultura*. 5 (2): 706–717. <http://dx.doi.org/10.24297/jaa.v5i2.5085>
- Parr. 1999. 1266 Isoperibol Bomb Calorimeter. Operating Instruction Manual. Technical Note No. 367M. Parr Instrument Company. Moline, IL, USA. 1. <https://www.scribd.com/document/149825356/Calorimetre> (Recuperado: abril, 2022).
- Piccolo C, Bezzo F. 2009. A techno-economic comparison between two technologies for bioethanol production from lignocellulose. *Biomass & Bioenergy* 33 (3): 478–491. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.008>
- Ram ND, Salam PA. 2012. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel* 99: 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>
- Rojas-García AR, Torres-Salado N, Maldonado-Peralta, MDLÁ, Sánchez-Santillán P, García-Balbuena A, Mendoza-Pedroza SI, Hernández-Garay A. 2018. Curva de crecimiento y calidad del pasto cobra (*Brachiaria* híbrido br02/1794) a dos intensidades de corte. *Agroproductividad* 11 (5): 34–39.
- Said MSM, Ghani WAWAK, Boon TH, Hussain SA, Ng DKS. 2019. Thermochemical conversion of Napier grass for production of renewable syngas. *Processes* 7 (10): 705. <https://doi.org/10.3390/pr7100705>
- Samson R, Mani S, Boddey R, Sokhansanj S, Quesada D, Urquiaga S, Ho LC. 2005. The potential of  $C_4$  perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24 (5–6): 461–495. <https://doi.org/10.1080/07352680500316508>
- Santiago-Ortega MA, Honorato-Salazar JA, Quero-Carrillo AR, Hernández-Garay A, López-Castañeda C, López-Guerrero I. 2016. Biomasa de *Urochloa brizantha* cv. Toledo como materia prima para la producción de bioetanol. *Agrociencia* 50 (6): 711–726.
- SAS Institute. 2011. SAS/STAT User's Guide. Release 9.3. SAS Institute Inc.: Cary, NC, USA. 564 p.
- Souza-Rodrigues R, de Almeida, MN, Maitan-Alfnas, GP, Ventorim, RZ, Sartori, SR, Visser, ME, Rezende, STD. 2021. *Brachiaria brizantha* grass as a feedstock for ethanol production. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 64 (1): 1-13. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021200397>
- Sun SC, Sun D, Cao XF. 2021. Effect of integrated treatment on enhancing the enzymatic hydrolysis of cocksfoot grass and the structural characteristics of co-produced hemicelluloses. *Biotechnology for Biofuels* 14 (88): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01944-8>
- Van Soest PJ. 1994. *Nutritional ecology of the ruminant* (2nd Edition); Cornell University Press: Ithaca, NY, USA. 488 p.
- Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74 (10): 3583–3589. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Ventura-Ríos J, Reyes-Vázquez I, García-Salas A, Muñoz-García C, Muro-Reyes A, Maldonado-

- Peralta MA, Rojas-García A, Cruz-Hernández A. 2019. Rendimiento, perfiles nutrimentales y de fermentación ruminal in vitro de pasto Maralfalfa (*Cenchrus purpureus* Schumach.) Morrone a diferentes frecuencias de corte en clima cálido. *Acta Universitaria* 29 (1):1–11. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2204>
- Ventura-Ríos J, Honorato-Salazar JA, Santiago-Ortega MA, Barrera-Martínez I. 2021a. Biomass and energy characteristics of Maralfalfa grass (*Cenchrus purpureus* Schumach.) Morrone cultivated in warm subhumid climate to produce bioethanol. *Agrociencia* 55 (5): 389–401. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i5.2515>
- Ventura-Ríos J, Santiago-Ortega MA, Barrera-Martínez I, Álvarez-Vázquez P, Carrillo-López P, Honorato-Salazar JA. 2021b. Caracterización del pasto mombaza como materia prima para producir bioetanol. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12 (2): 235–246. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2441>
- Ventura Ríos J, Santiago-Ortega MA, Maldonado-Peralta MA, Álvarez-Vázquez P, Maldonado-Peralta R, Barrera-Martínez I, Wilson-García CY. 2021c. Biomasa de *Urochloa humidicola* como materia prima para producir biocombustible. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44 (4A): 797–804. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4-A.797>
- Ventura-Ríos J, Honorato-Salazar JA, Apolinar-Hidalgo F, Barrera-Martínez I, Aburto-Anell J, Vaquera-Huerta H. 2022. Agronomic characterization of Taiwan grass [*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone] and evaluation of its potential to produce bioethanol in the warm sub-humid climate of Mexico. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* 10 (1): 22–31. [https://doi.org/10.17138/tgft\(10\)22-31](https://doi.org/10.17138/tgft(10)22-31)
- Vogel KP, Casler MD, Dien BS. 2017. Switchgrass biomass composition traits and their effects on its digestion by ruminants and bioconversion to ethanol. *Crop Science* 57(1): 275–281. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.07.0625>
- Wang S, Li W, Alrueyemi I. 2021. On the investigation of effective factors on higher heating value of biodiesel: robust modeling and data assessments. *Bio Med Research International* 2021 (4): 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/4814888>
- Wongwatanapaiboon J, Kangvansaichol K, Burapatana V, Inochanon R, Winayanuwattikun P, Yongvanich T, Chulalaksananukul W. 2012. The potential of cellulosic ethanol production from grasses in Thailand. *BioMed Research International* 2012: 1–10. <https://doi.org/10.1155/2012/303748>
- Zhao YL, Dolat A, Steinberger Y, Wang X, Osman A, Xie G H. 2009. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Research* 111 (1-2): 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.006>

## IDENTIFICATION AND CHEMICAL COMPOSITION OF FORAGE RESOURCES CONSUMED BY GOATS IN THE MIXTECA REGION OF OAXACA, MEXICO

Jacinto Efrén **Ramírez-Bribiesca**<sup>1</sup>, José Carlos **López-Ojeda**<sup>1\*</sup>, Ramón **Robles-Soriano**<sup>2</sup>,  
Serafín Jacobo **López-Garrido**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Ganadería. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56264.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Departamento de Biología de la Reproducción. Avenida San Rafael Atlixco 186, Colonia Vicentina, Delegación Iztapalapa, Mexico City, Mexico. C. P. 09340.

<sup>3</sup> Universidad del Mar Campus Puerto Escondido. Carretera Vía Sola de Vega-Puerto Escondido, San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, Mexico. C. P. 71980.

\* Author for correspondence: jclo\_86@hotmail.com

### ABSTRACT

The Mixteca region of Oaxaca, Mexico, is characterized by extensive grazing of various grasses, shrubs, and trees to raise goats. The objective of this study was to identify and determine the dry matter (DM), organic matter (OM), crude protein, neutral detergent fiber (NDF), and in vitro dry matter digestibility (IVDMD) of the species consumed by goats in the Mixteca region of Oaxaca. The direct observation method was used to collect forage from the species during the rainy (August-September) and dry (April-May) seasons. A botanical collection was made for later identification. The variables considered were the season (rainy, dry) and growth habit (tree, shrub, herbaceous, pod) as treatments. The chemical composition values were analyzed with a completely randomized experimental design. A total of 116 species were identified, of which 74 % were found in the rainy season and 26 % in the dry season. By growth habit, 42 % were trees, 34 % shrubs, and 24 % herbaceous. In addition, 11 % of the total species provided pods that goats consumed. The Fabaceae family was the most represented. Regarding chemical composition, the NDF content of the species was higher ( $p \leq 0.05$ ) in the rainy season. By growth habit, the highest values obtained ( $p \leq 0.05$ ) for DM were in herbaceous and pods; for OM, in pods; for NDF, in pods and trees; and for IVDMD, in trees, shrubs, and pods. The goat livestock of the Mixteca region in Oaxaca has an important ecological niche. The evaluated species maintain a variable chemical composition between the rainy and dry seasons.

**Keywords:** grazing, goats, tree, shrub, herbaceous, chemical composition.

### INTRODUCTION

Goat farming has a strong presence in the Mixteca region. Their feeding is mainly based on grazing and browsing on trees, shrubs, and herbaceous plants that are found in large areas of land considered as areas of abundant biodiversity (García-

**Citation:** Ramírez-Bribiesca JE, López-Ojeda JC, Robles-Soriano R, López-Garrido sF. 2023. Identification and chemical composition of forage resources consumed by goats in the Mixteca region of Oaxaca, Mexico.

*Agrociencia* 57(3): 454-475.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2917>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 30, 2022.  
Approved: February 28, 2023.  
**Published in *Agrociencia*:**  
April 20, 2023.

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



Mendoza *et al.*, 2004). These are small-scale systems, with family labor and minimal health practices (Arias *et al.*, 2014). The main product of goat farming in the area is the adult animal, so their body condition is the factor that determines the sale price (Ortiz-Morales *et al.*, 2021).

One of the problems identified in regional diagnostics of goat production is their limited productivity. This is because the biomass production of the consumed plants varies throughout the year, so there is variety and availability for goats in wet seasons. In contrast, the opposite happens in the dry season, causing a cycle of weight loss-gain. Studies on the use of natural resources for goat production in the Oaxacan Mixteca region are isolated (Arias *et al.*, 2014; Franco-Guerra *et al.*, 2014). It is reported that the crude protein (CP) content of trees and shrubs generally doubles that of grasses. In addition, neutral detergent fiber (NDF) values between 20 and 35 % have high values of in vitro dry matter digestibility (IVDMD) (Delgado and Ramírez, 2008).

Therefore, it was hypothesized that the nutritional quality of the plant species consumed by goats during grazing varies according to the season, growth habit, and community. This study aimed to identify and determine the chemical composition of plants consumed by grazing livestock during the dry and rainy seasons in the Mixteca region of Oaxaca.

## MATERIALS AND METHODS

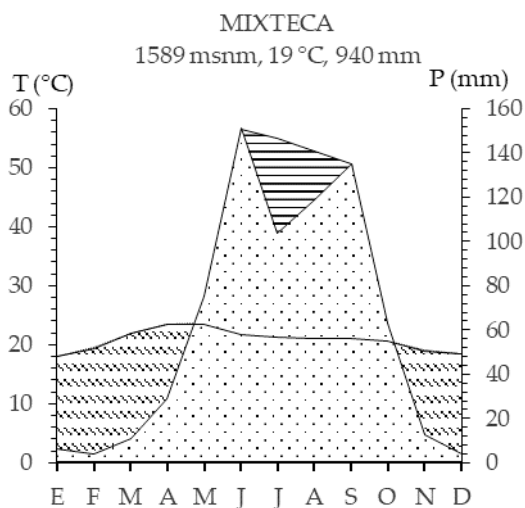
### Area of Study

The study was carried out in five localities (Chocani, CHO; Guadalupe Cuautepéc, GC; Guadalupe La Huertilla, GIH; San Marcos Arteaga, SMA; and Santa María Tindú, SMT) of the Mixteca region of the state of Oaxaca (17° 48' 00" N, 97° 46' 00" W), located in the physiographic province of the Sierra Madre del Sur which has foothills with altitudes between 1000 and 2700 m. The climates are semi-warm subhumid (A)C(w2), (A)C(w1), (A)C(w0) and temperate subhumid C(w2), C(w1), C(w0) (García, 2004). The temperature ranges from 16 to 26 °C, while precipitation fluctuates from 628 to 742 mm. Figure 1 was elaborated from the climatological normal consulted in the National Meteorological Service during the period 1951-2010 for the municipalities of Huajuapán de León, Mariscala de Juárez, Tamazulápam del progreso, and Tezoatlán de Segura y Luna (SMN, 2022).

The representative vegetation types are thorny shrubland, low deciduous jungle, and oak forest.

### Sampling

In each community, participatory workshops were conducted with goat producers interested in the study. The workshops were held during the rainy (August-September) and dry (April-May) seasons to learn about the grazing routes that producers typically take with their herds. Two different routes were followed in each community: transhumant and non-transhumant (Ortiz-Morales *et al.*, 2021), which were traversed for 6 days. Each grazing day lasted 8 hours per day. Leaves and stems were the plants'



**Figure 1.** Ombrothermic diagram of the Mixteca region. The average altitude, temperature, and precipitation are shown at the top. The highest temperatures are recorded from March to May, which is considered the driest period. There are intense rains in June and September, with an intra-festival drought recorded in July.

sampled parts considered forage consumed by the goats. 500 g of forage or tree, shrub, and herbaceous pods were collected; the samples were processed for subsequent laboratory analysis. Direct observation method (Arias *et al.*, 2014; Mandujano *et al.*, 2019) was used for forage sampling. An animal was randomly observed for a minute to determine the species being consumed during grazing; the producers provided the names of each species. In addition, specimens of each plant were collected in triplicate for subsequent botanical identification. A total of 182 samples (35 in CHO, 45 in SMT, 30 in GH, 30 in GC, and 42 in SMA) were collected during both periods.

#### Chemical composition and degradability

Dry matter (DM), organic matter (OM), and CP were determined as established by the Association of Official Agricultural Chemists (AOAC, 2000), while NDF was evaluated as referred by Van Soest and Wine (1967). IVDMD was determined using the method described by Tilley and Terry (1963).

#### Statistical Analysis

Considering the period (rainy season, dry season), growth habit (tree, shrub, herbaceous, pod), and communities (CHO, GC, GIH, SMA, SMT) as treatments (Cabrera-Núñez, *et al.*, 2019), the concentration of DM, OM, CP, NDF, and IVDMD was compared using a completely randomized experimental design using the GLM procedure, in addition to a Tukey test ( $p \leq 0.05$ ) for the comparison of means using the statistical package SAS (2002). The model used was:

$$Y_{ijk} = \mu + P_k + G_j + C_i + CG_{ij} + CP_{ik} + GP_{jk} + e_{ijk}$$

where  $Y_{ijk}$  is the dependent variable;  $\mu$ , the effect of the overall mean;  $P_k$ , the effect of the period;  $G_j$ , the effect of growth habit;  $C_i$ , the effect of the community;  $CG_{ij}$ , the effect of the interaction between community and growth habit;  $CP_{ik}$ , the effect of the interaction between community and period;  $GP_{jk}$ , the effect of the interaction between growth habit and period; and  $e_{ijk}$  the effect of experimental error.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Species identification

A total of 116 plant species were botanically identified, 86 in the rainy season and 30 in the dry season; furthermore, 18 were present in both periods (Table 1). Of the total, 57 % belonged to the families Fabaceae, Asteraceae, and Fagaceae. Regarding growth habit, 42 % were trees, 34 % were shrubs, and 24 % were herbaceous. Additionally, six trees and seven shrubs produced pods at different times (nine in the rainy season and four in the dry season).

**Table 1.** Mean values of dry matter, organic matter, crude protein, neutral detergent fiber, and in vitro dry matter digestibility by species, family, period, and growth habit.

Specie	Family	Period	Community	GH	DM	OM	CP	NDF	IVDMD
<i>Quercus</i> sp.	Fagaceae	Rainy	CHO, SMT, SMA	Tr	46.4	91.4	8.9	53.3	79.5
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Fabaceae	Rainy	CHO, SMT, SMA, GC	Tr	49.3	88.7	15.2	50.4	69.5
<i>Heliocarpus americanus</i>	Tiliaceae	Rainy	GIH, SMT, SMA	Tr	62.8	86.1	11.0	44.9	62.3
<i>Bursera aspleniifolia</i> Brandegee	Burseraceae	Rainy	GIH, GC	Tr	47.9	83.2	11.2	46.0	70.8
<i>Leucaena leucocephala</i>	Fabaceae	Rainy	GIH, SMA	Tr	58.0	88.8	11.7	39.1	62.6
<i>Prosopis laevigata</i>	Fabaceae	Rainy	CHO, GIH	Tr	50.8	88.5	21.0	42.3	73.8
<i>Lysiloma acapulcense</i>	Fabaceae	Rainy	SMT, GC	Tr	54.2	90.9	12.5	55.3	75.7
<i>Lysiloma divaricatum</i>	Fabaceae	Rainy	GIH, SMA	Tr	52.8	92.9	14.6	38.8	68.7
<i>Bursera glabrifolia</i>	Burseraceae	Rainy	SMT, GC	Tr	54.9	80.6	10.9	42.4	70.1
<i>Bursera áptera</i>	Burseraceae	Rainy	SMT, SMA	Tr	47.3	87.8	10.3	43.2	73.2
<i>Fraxinus purpusii</i>	Oleaceae	Rainy	SMT, SMA	Tr	46.6	91.1	8.0	36.9	73.3
<i>Acacia bilimekii</i>	Fabaceae	Rainy	SMT, GC	Tr	38.5	89.5	11.7	49.7	68.6
<i>Quercus acutifolia</i>	Fagaceae	Rainy	GC	Tr	46.8	92.1	9.9	55.5	73.4
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	Rosaceae	Rainy	GC	Tr	49.2	87.4	8.3	42.6	65.5
<i>Quercus sebifera</i>	Fagaceae	Rainy	CHO	Tr	40.4	90.8	7.3	51.9	88.8
<i>Cupressus</i> sp.	Cupressaceae	Rainy	SMT	Tr	56.3	92.6	8.1	50.1	85.3
<i>Pinus</i> sp.	Pinaceae	Rainy	SMT	Tr	52.9	93.5	5.2	65.6	84.9
<i>Actinocheita potentillifolia</i>	Anacardiaceae	Rainy	SMT	Tr	52.4	85.6	10.1	39.9	70.2
<i>Quercus magnoliifolia</i>	Fagaceae	Rainy	SMT	Tr	49.1	92.6	8.3	47.0	80.8
<i>Acacia coulteri</i>	Fabaceae	Rainy	GIH	Tr	50.0	88.0	16.2	34.8	70.6
<i>Saurauia aspera</i>	Actinidiaceae	Rainy	CHO	Tr	47.8	88.9	7.8	19.9	84.1
<i>Gliricidia sepium</i>	Fabaceae	Rainy	SMA	Tr	52.4	86.0	16.0	44.5	57.6
<i>Lysiloma tergeminum</i>	Fabaceae	Rainy	GIH	Tr	50.3	90.7	11.8	47.2	69.7
<i>Bunchosia lindeniana</i>	Malpighiaceae	Rainy	SMA	Tr	45.2	88.7	5.4	45.0	67.4

**Table 1.** Continue

Specie	Family	Period	Community	GH	DM	OM	CP	NDF	IVDMD
<i>Casimiroa</i> sp.	Rutaceae	Rainy	SMT	Tr	55.6	85.2	13.4	39.5	63.4
<i>Acacia pennatula</i>	Fabaceae	Rainy	SMT	Tr	51.3	92.6	12.4	58.9	88.2
<i>Quercus glaucooides</i>	Fagaceae	Rainy	GC	Tr	49.8	90.2	10.8	53.7	65.2
<i>Bursera fagaroides</i>	Burseraceae	Rainy	SMA	Tr	53.5	86.0	9.1	16.4	53.7
<i>Quercus rugosa</i>	Fagaceae	Rainy	SMT	Tr	42.0	93.6	6.3	66.8	83.3
<i>Leucaena macrophylla</i>	Fabaceae	Rainy	SMT	Tr	62.6	91.1	19.0	61.5	81.9
<i>Cercocarpus betuloides</i>	Rosaceae	Rainy	CHO	Tr	49.2	89.8	9.9	40.5	78.0
<i>Leucaena</i> sp.	Fabaceae	Rainy	CHO	Tr	51.5	90.3	9.4	41.9	84.0
<i>Thevetia thevetioides</i>	Apocynaceae	Rainy	GIH	Tr	66.8	84.3	10.4	42.9	60.3
<i>Bursera linanoe</i>	Burseraceae	Rainy	GIH	Tr	54.9	81.5	9.1	49.6	62.1
<i>Haematoxylon brasiletto</i>	Fabaceae	Rainy	GIH	Tr	46.1	85.2	11.1	33.1	66.4
<i>Acacia cochliacantha</i>	Fabaceae	Rainy	SMT, SMA, GIH, GC	Sh	46.9	90.2	13.6	46.1	76.8
<i>Dodonaea viscosa</i>	Sapindaceae	Rainy	SMT, GC, SMA	Sh	60.1	88.6	10.0	36.2	67.4
<i>Rhus standleyi</i>	Anacardiaceae	Rainy	SMT, CHO	Sh	43.3	92.3	5.8	40.7	80.2
<i>Mimosa fasciculata</i>	Fabaceae	Rainy	GC, SMA	Sh	49.4	91.8	11.6	52.5	70.5
<i>Karwinskia humboldtiana</i>	Rhamnaceae	Rainy	SMA	Sh	55.2	86.4	8.8	49.0	66.3
<i>Amelanchier denticulata</i>	Rosaceae	Rainy	CHO, GC	Sh	38.0	89.1	6.1	39.8	72.4
<i>Mimosa polyantha</i>	Fabaceae	Rainy	GIH	Sh	48.3	82.4	14.1	27.7	56.2
<i>Acacia farnesiana</i>	Fabaceae	Rainy	SMA	Sh	46.8	88.9	22.9	46.5	62.0
<i>Acacia angustissima</i>	Fabaceae	Rainy	SMT, CHO	Sh	47.6	84.6	14.6	29.7	87.2
<i>Zanthoxylum liebmanniana</i>	Rutaceae	Rainy	SMT, SMA	Sh	52.8	86.1	11.4	27.2	47.5
<i>Acacia schaffneri</i>	Fabaceae	Rainy	CHO	Sh	37.4	90.6	17.0	47.7	86.4
<i>Cercocarpus</i> sp.	Rutaceae	Rainy	SMT	Sh	52.5	93.3	9.4	46.6	80.2
<i>Desmodium orbiculare</i>	Fabaceae	Rainy	CHO	Sh	52.4	86.5	13.8	37.3	80.8
<i>Pithecellobium acatense</i>	Fabaceae	Rainy	GIH	Sh	46.4	89.5	14.5	49.6	81.0
<i>Bourreria obovata</i>	Boraginaceae	Rainy	GIH	Sh	42.9	77.7	7.3	38.1	67.5
<i>Cassia pringlei</i>	Caesalpinaceae	Rainy	GIH	Sh	57.5	79.0	11.4	32.7	65.0
<i>Brongniartia benthamiana</i>	Fabaceae	Rainy	GC	Sh	62.0	84.4	10.4	36.8	54.4
<i>Pisonia macranthocarpa</i>	Nyctaginaceae	Rainy	GIH	Sh	60.1	81.1	16.7	55.1	75.7
<i>Gagnebina</i> sp.	Fabaceae	Rainy	GIH	Sh	52.1	84.1	12.9	34.8	62.9
<i>Rhus oxacana</i>	Anacardiaceae	Rainy	SMT	Sh	53.3	93.9	7.4	46.7	74.9
<i>Garrya ovata</i>	Garryaceae	Rainy	CHO	Sh	41.9	89.2	5.6	48.4	79.6
<i>Tecoma stans</i>	Bignoniaceae	Rainy	GC	Sh	38.6	88.6	6.5	40.0	51.5
<i>Caesalpinia melanadenia</i>	Fabaceae	Rainy	SMA	Sh	48.4	88.4	14.2	48.2	81.3
<i>Lindleya mespiloides</i>	Rosaceae	Rainy	CHO	Sh	48.2	88.6	7.3	31.7	75.3
<i>Forestiera phillyreoides</i>	Oleaceae	Rainy	SMA	Sh	50.9	89.6	6.9	37.8	74.9
<i>Forestiera rotundifolia</i>	Oleaceae	Rainy	SMT	Sh	72.2	81.4	12.8	52.2	62.7
<i>Dalea greggii</i>	Fabaceae	Rainy	GC, CHO	He	55.8	89.6	10.6	48.6	77.7
<i>Cosmos sulphureus</i>	Asteraceae	Rainy	SMT, SMA	He	69.6	88.6	11.2	46.6	64.5
<i>Montanoa</i> sp.	Asteraceae	Rainy	SMT, SMA	He	60.1	81.8	10.7	41.5	65.3
<i>Rhynchelytrum repens</i>	Poaceae	Rainy	GC, SMA	He	64.8	88.5	3.8	74.8	57.4
<i>Macroptilium gibbosifolium</i>	Fabaceae	Rainy	SMA	He	61.1	92.7	10.9	58.9	60.3
<i>Montanoa tomentosa</i>	Asteraceae	Rainy	CHO	He	65.9	82.2	19.6	35.5	74.7
<i>Montanoa leucantha</i>	Asteraceae	Rainy	GC	He	47.4	80.4	19.7	30.5	51.9
<i>Calea zacatechichi</i>	Asteraceae	Rainy	SMT	He	63.1	84.7	11.8	31.9	68.8
<i>Tagetes erecta</i>	Asteraceae	Rainy	SMA	He	62.8	89.3	10.8	44.9	54.8
<i>Dalea foliolosa</i>	Fabaceae	Rainy	SMT	He	60.5	86.2	9.4	49.9	77.0
<i>Bidens anthemoides</i>	Asteraceae	Rainy	SMA	He	63.5	74.2	18.4	25.5	60.4
<i>Porophyllum ruderale</i>	Asteraceae	Rainy	CHO	He	69.9	76.0	11.3	22.3	68.7

**Table 1.** Continue

Specie	Family	Period	Community	GH	DM	OM	CP	NDF	IVDMD
<i>Chamaecrista nictitans</i>	Fabaceae	Rainy	SMA	He	59.9	93.5	13.4	49.8	70.7
<i>Calea ternifolia</i>	Asteraceae	Rainy	GC	He	63.3	83.7	11.3	35.7	58.8
<i>Cissus</i> sp.	Vitaceae	Rainy	GIH	He	66.9	87.3	14.0	41.3	60.5
<i>Salvia lasiantha</i>	Lamiaceae	Rainy	CHO	He	68.0	79.9	20.5	27.5	67.3
<i>Rhynchosia minima</i>	Fabaceae	Rainy	SMT	He	66.7	85.4	13.7	29.8	67.1
<i>Dalea mutabilis</i>	Fabaceae	Rainy	GC	He	53.7	88.3	14.6	45.5	29.6
<i>Salvia sessei</i>	Lamiaceae	Rainy	SMT	He	62.0	88.9	9.7	34.7	83.4
<i>Desmodium angustifolium</i>	Fabaceae	Rainy	SMT	He	69.4	89.0	12.3	55.0	68.9
<i>Tithonia</i> sp.	Asteraceae	Rainy	SMT	He	76.6	79.2	12.6	33.0	69.7
<i>Gonolobus</i> sp.	Apocynaceae	Rainy	GIH	He	68.6	75.1	17.7	27.3	51.0
<i>Bidens pilosa</i>	Asteraceae	Rainy	SMA	He	59.7	86.3	11.3	35.8	68.4
<i>Mimosa albida</i>	Fabaceae	Rainy	SMA	He	61.3	90.5	13.5	51.8	68.7
<i>Montanoa hibiscifolia</i>	Asteraceae	Rainy	SMA	He	48.9	82.2	15.0	32.5	60.3
<i>Quercus</i> sp.	Fagaceae	Dry	SMT, SMA	Tr	54.6	91.0	10.3	44.5	75.9
<i>Cupressus</i> sp.	Cupressaceae	Dry	SMT, GC	Tr	44.8	89.9	6.3	42.0	75.7
<i>Lysiloma acapulcense</i>	Fabaceae	Dry	SMT, GC	Tr	52.2	89.2	10.6	45.5	78.8
<i>Quercus magnoliifolia</i>	Fagaceae	Dry	SMT	Tr	54.6	92.5	7.3	40.6	74.5
<i>Pseudosmodingium multifolium</i>	Anacardiaceae	Dry	SMT	Tr	49.1	92.0	10.3	36.4	67.6
<i>Acacia pennatula</i>	Fabaceae	Dry	SMT	Tr	50.8	90.7	13.5	50.0	80.7
<i>Ficus</i> sp.	Moraceae	Dry	GIH	Tr	70.7	84.2	16.4	49.1	61.5
<i>Quercus glaucooides</i>	Fagaceae	Dry	GC	Tr	47.8	91.3	9.7	46.6	80.7
<i>Salix bonplandiana</i>	Salicaceae	Dry	CHO	Tr	58.1	87.6	16.0	33.4	70.4
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	Rosaceae	Dry	GC	Tr	39.8	87.2	8.0	36.6	69.7
<i>Thevetia thevetioides</i>	Apocynaceae	Dry	GIH	Tr	36.6	82.3	4.9	26.7	65.1
<i>Pinus</i> sp.	Pinaceae	Dry	SMT	Tr	51.9	91.5	5.7	58.1	82.1
<i>Acacia bilimekii</i>	Fabaceae	Dry	GC	Tr	38.2	89.1	13.6	46.7	81.2
<i>Mimosa bentharii</i>	Fabaceae	Dry	GIH	Tr	50.8	89.3	23.4	36.6	61.6
<i>Acacia farnesiana</i>	Fabaceae	Dry	CHO, GC, SMT, SMA	Sh	46.5	87.2	22.1	43.4	65.0
<i>Tecoma stans</i>	Bignoniaceae	Dry	CHO, GC	Sh	56.3	87.4	13.4	33.6	54.5
<i>Acacia cochliacantha</i>	Fabaceae	Dry	GC, SMA	Sh	53.5	89.6	25.8	45.3	78.2
<i>Pistacia mexicana</i>	Anacardiaceae	Dry	CHO	Sh	51.3	91.1	11.1	30.8	60.4
<i>Acacia schaffneri</i>	Fabaceae	Dry	CHO	Sh	41.4	90.1	17.4	54.1	74.1
<i>Rhus oaxacana</i>	Anacardiaceae	Dry	CHO	Sh	54.3	91.3	7.5	32.9	76.4
<i>Cassia mexicana</i>	Fabaceae	Dry	CHO	Sh	50.0	85.9	13.6	28.4	63.5
<i>Pisonia macranthocarpa</i>	Nyctaginaceae	Dry	GIH	Sh	66.0	82.9	23.4	51.6	50.8
<i>Dodonaea viscosa</i>	Sapindaceae	Dry	GC	Sh	45.8	87.3	6.9	23.2	76.1
<i>Rhus chondroloma</i>	Anacardiaceae	Dry	CHO	Sh	50.0	86.7	8.1	33.4	75.2
<i>Baccharis pteronioides</i>	Asteraceae	Dry	CHO	Sh	50.0	90.5	10.0	37.1	78.7
<i>Baccharis salicifolia</i>	Asteraceae	Dry	CHO	Sh	58.1	86.0	17.1	23.4	66.9
<i>Mimosa fasciculata</i>	Fabaceae	Dry	GC	Sh	55.4	88.7	16.2	47.9	75.1
<i>Mimosa calcicola</i>	Fabaceae	Dry	CHO	Sh	48.8	89.9	19.3	42.3	71.7
<i>Dalea filiciformis</i>	Fabaceae	Dry	CHO	He	53.1	88.4	13.9	29.1	67.6
<i>Senecio salignus</i>	Asteraceae	Dry	CHO	He	71.7	83.3	17.7	21.4	59.6
<i>Gymnosperma glutinosum</i>	Asteraceae	Dry	CHO	He	54.1	88.7	9.3	29.7	77.1
<i>Lysiloma divaricatum</i>	Fabaceae	Rainy	SMA, GIH	Pod	66.6	92.0	12.4	45.1	63.1
<i>Acacia cochliacantha</i>	Fabaceae	Rainy	SMA, SMT	Pod	68.0	93.7	6.4	71.3	79.9
<i>Mimosa polyantha</i>	Fabaceae	Rainy	GIH	Pod	61.3	89.2	19.5	51.1	59.5
<i>Acacia angustissima</i>	Fabaceae	Rainy	SMT	Pod	64.0	93.3	17.6	52.8	70.4
<i>Mimosa fasciculata</i>	Fabaceae	Rainy	SMA	Pod	63.5	93.5	9.4	66.2	72.7

**Table 1.** Continue

Specie	Family	Period	Community	GH	DM	OM	CP	NDF	IVDMD
<i>Acacia pennatula</i>	Fabaceae	Rainy	SMT	Pod	59.5	94.9	6.6	71.5	86.0
<i>Pithecollobium acatlense</i>	Fabaceae	Rainy	GIH	Pod	61.9	93.1	15.0	52.2	72.1
<i>Gliricidia sepium</i>	Fabaceae	Rainy	SMA	Pod	58.6	89.2	17.6	42.8	56.5
<i>Haematoxylon brasiletto</i>	Fabaceae	Rainy	GIH	Pod	60.6	91.5	10.5	46.9	65.2
<i>Acacia farnesiana</i>	Fabaceae	Dry	CHO, SMA	Pod	9.0	89.3	13.2	27.5	53.5
<i>Acacia schaffneri</i>	Fabaceae	Dry	CHO	Pod	61.5	91.2	11.1	22.8	64.4
<i>Prosopis laevigata</i>	Fabaceae	Dry	SMA	Pod	43.9	90.5	10.6	44.3	56.6
<i>Mimosa bentharii</i>	Fabaceae	Dry	GIH	Pod	53.4	90.7	18.0	46.7	59.9

DM: dry matter %; OM: organic matter %; CP: crude protein %; NDF: neutral detergent fiber %; IVDMD: *In vitro* dry matter digestibility %; CHO: Chocani; GC: Guadalupe Cuauhtepic; GIH: Guadalupe La Huertilla; SMA: San Marcos Arteaga; SMT: Santa María Tindú. GH: growth habit; Tr: tree, Sh: shrub, He: herbaceous.

The Mixteca region is considered one of the regions with the greatest biodiversity due to its heterogeneous vegetation cover. Despite this, there are few studies that systematize information on floristic richness (García-Mendoza *et al.*, 2004; Reyes-Santiago, 2012). Knowledge about the structure, composition, and floristic diversity of grazing areas is essential for making decisions about the sustainable management of these natural resources (Lira-Noriega *et al.*, 2007). The total number of species identified in the present study is higher than that reported by Arias *et al.* (2014) and Franco-Guerra *et al.* (2014) in the same region. It should be mentioned that these are the only studies that provide information on the use of forest species consumed by goat livestock in the study area. This characterization of species could be considered for the establishment of agroforestry systems or reforestation programs in the region, considering that the territory of the Mixteca has high erosion (Guerrero-Arenas *et al.*, 2010). The Fabaceae family is also described in other parts of the country as the most important due to the number of species that goats use (Hernández *et al.*, 2008; Salgado-Beltrán *et al.*, 2020; García-Fragoso *et al.*, 2021). Worldwide, Mexico is the second country with the greatest diversity of plants for this family, where everything from vines and herbaceous plants to shrubs and trees can be found, which are important in the diet of ruminants due to the high protein content in their foliage (Pinto-Ruiz *et al.*, 2010) or fruit (Arias *et al.*, 2014).

#### Chemical composition and degradability

PC, NDF, and IVDMD ranged from 23.4–3.8, 74.8–16.4, and 87.2–47.5 %, respectively, by period and growth habit (Table 1). Of all the species, 65 % and 88 % had CP and IVDMD concentrations greater than 10 % and 60 %, respectively, while 96 % maintained values below 60 % of NDF (Table 1). Despite the extensive variety of forage species, their establishment and use have been low and limited to some species (Ayala-Burgos *et al.*, 2006; Barrientos-Ramírez *et al.*, 2012). In this regard, it is suggested to study and recommend species with forage potential for use in feeding based on their density,

biomass productivity (Ramos-Trejo *et al.*, 2016), and nutritional value for agro-ecological environments (Jiménez-Ferrer *et al.*, 2008; Quero-Carrillo *et al.*, 2012) and specific livestock production systems (Arias *et al.*, 2014; Franco-Guerra *et al.*, 2014). On the other hand, the percentages of DM, OM, CP, and IVDMD were not different between periods ( $p \geq 0.05$ ) (Table 2). However, during the rainy period, the concentration of NDF was higher ( $p \leq 0.05$ ), which has been previously reported in forages from the humid tropics in Chiapas (Muñoz-González *et al.*, 2016). The variation of NDF between periods is due to the fact that during the dry season, the sampled species were in the regrowth stage when the proportion of the secondary wall is lower. Vegetative species in the physiological stage of regrowth or flowering have a higher probability of being consumed by grazing goats because their nutritional value is higher (Mancilla-Leytón *et al.*, 2014). Moreover, a high proportion of stems or branches in the samples increases the concentration of NDF because these parts maintain a higher proportion of structural carbohydrates (Cobos *et al.*, 2003).

**Table 2.** Dry matter, organic matter, crude protein, neutral detergent fiber, in vitro dry matter digestibility by period, growth habit, and community.

	N	DM	OM	CP	NDF	IVDMD
<b>Period</b>						
Rainy	136	55.7±9.1	88.1±4.2	11.9±4.8	44.9±11.6 a	68.7±10.8
Dry	46	53.2±14.6	88.7±6.7	13.7±7.7	38.4±18.5 b	67.5±17.1
<b>Growth habit</b>						
Tree	99	50.1±12.1 b	88.9±5.6 b	11.3±6.4	43.1±15.4 ab	72.3±14.3 a
Shrub	40	50.4±13.1 b	87.6±6.1 bc	12.9±6.9	39.1±16.7 b	70.0±15.4 ab
Herbaceous	27	61.5±16.7 a	85.3±7.7 c	13.8±8.9	36.4±21.2 b	64.2±19.6 b
Pod	16	55.9±22.8 ab	91.9±10.5 a	13.2±12.1	48.0±29.1 a	65.9±26.8 ab
<b>Community</b>						
Chocani	35	48.9±19.6 b	88.0±5.9	12.5±7.9 ab	35.9±16.3 b	74.6±16.9 a
Guadalupe Cuauhtepic	45	50.8±19.3 ab	87.2±5.7	11.9±10.5 ab	44.2±16.4 a	65.9±20.4 b
Guadalupe La Huertilla	30	53.8±17.6 ab	85.9±8.2	14.1±8.8 a	42.4±14.3 a	64.5±12.3 b
San Marcos Arteaga	30	54.7±14.1 a	88.7±6.5	11.9±6.8 ab	45.2±18.5 a	65.4±14.0 b
Santa María Tindu	42	55.5±13.2 a	88.9±11.8	10.9±5.5 b	47.3±16.4 a	76.3±12.1 a

a,b,c Mean values ± SEM per column with different letter are statistically different ( $p \leq 0.05$ ). DM: dry matter %; OM: organic matter %; CP: crude protein %; NDF: neutral detergent fiber %; IVDMD: *in vitro* dry matter digestibility %.

By growth habit, the percentage of DM was higher ( $p \leq 0.05$ ) in herbaceous and pods, OM in pods, NDF in pods and trees, and IVDMD in trees, shrubs, and pods. The variation in the chemical composition and IVDMD among trees, shrubs, herbaceous, and pods may be caused by the diversity of prevailing factors such as altitude, precipitation, soil type, and available nutrients (Savadogo *et al.*, 2007), as they can act as modulators of photosynthesis, altering the nutritional value of the forage (Azcón-Bieto and Talón, 2013).

Goats show adaptation capacity in their grazing behavior by modifying their feeding behavior in response to the variable chemical composition of forage during different seasons of the year, as they can easily switch between the herbaceous, shrubby, or arboreal strata, or vice versa (Ouédraogo-Koné *et al.*, 2006; Armenta-Quintana *et al.*, 2011; Egea *et al.*, 2014). The percentages of DM, CP, NDF, and IVDMD of the species among communities were different ( $p \leq 0.05$ ) (Table 2). The interaction period-growth habit was greater ( $p \leq 0.05$ ) in CP and DM, while the period-community interaction was greater ( $p \leq 0.05$ ) in IVDMD and DM (Table 3).

**Table 3.** Effect of the interaction between period, growth habit, and community on dry matter concentration, organic matter, crude protein, neutral detergent fiber, and in vitro dry matter digestibility.

Interaction <sup>†</sup>	DM	OM	CP	NDF	IVDMD
Period – Growth habit	$\leq 0.0012$	0.4183	$\leq 0.0001$	0.1108	0.5157
Period – Community	$\leq 0.0118$	0.9502	0.6399	0.9419	$\leq 0.0001$
Period – Community – Growth habit	0.6697	0.8175	0.7194	0.7441	0.548

<sup>†</sup>The variables showed interaction period-community-growth habit ( $p \leq 0.05$ ). DM: dry matter %; OM: organic matter %; CP: crude protein %; NDF: neutral detergent fiber %; IVDMD: in vitro dry matter digestibility %.

## CONCLUSION

Goat livestock in the Mixteca region of Oaxaca, Mexico, has an important ecological niche. The number of forage species decreases during drought in grazing areas, and their chemical composition varies between the rainy and drought periods. The collection of pods during the abundance period could be strategic in goat feeding during the drought period due to their high crude protein content.

## ACKNOWLEDGMENTS

The support of the College of Postgraduates and the line “Efficient livestock in sustainable well-being, climate change and biotechnological precisions” is appreciated.

## REFERENCES

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2000. Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemists: Arlington, VA, USA. 771 p.
- Arias L, Soriano-Robles R, González-Esquivel CE, Sánchez E. 2014. Chemical composition and *in vitro* digestibility of fodder trees and shrubs consumed by goats in the Low Mixteca Region of Oaxaca, Mexico. *Research Journal of Biological Sciences* 9 (2): 92–97.
- Armenta-Quintana JA, Ramírez-Orduña R, Ramírez-Lozano RG. 2011. Utilización del forraje y selección de la dieta por cabras pastando en un matorral sarcocauléscente en el noroeste de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 163–71. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.110>
- Ayala-Burgos A, Cetina-Góngora R, Capetillo-Leal C, Zapata-Campos C, Sandoval-Castro C. 2006. Composición química - nutricional de árboles forrajeros. *Compilación de análisis de*

- laboratorio de nutrición animal. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia: Mérida, México. 60 p.
- Azcón-Bieto J, Talón M. 2013. Fundamentos de Fisiología Vegetal (Segunda edición). McGraw-Hill Interamericana de España: Barcelona, España. 669 p.
- Barrientos-Ramírez L, Vargas-Radillo JJ, Rodríguez-Rivas A, Ochoa-Ruiz HG, Navarro-Arzate F, Zorrilla J. 2012. Evaluación de las características del fruto del huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.) para su uso potencial en el curtido de pieles o alimentación animal. *Madera y Bosques* 18 (3): 23–35.
- Cabrera-Núñez A, Lammoglia-Villagomez M, Alarcón-Pulido S, Martínez-Sánchez C, Rojas-Ronquillo R, Velázquez-Jiménez S. 2019. Árboles y arbustos forrajeros utilizados para la alimentación de ganado bovino en el norte de Veracruz, México. *Abanico Veterinario* 9 (1): 1–12. <https://doi.org/10.21929/abavet2019.913>
- Cobos-Peralta MA, Mateo-Sánchez J, Trinidad-Santos A, Cetina-Alcalá V, Vargas-Hernández J. 2003. Importancia del tipo de muestra en la estimación del valor nutritivo de leguminosas y arbustivas, y potencial de un inocuo de bacterias degradadoras de aserrín en sistemas silvopastoriles. In Sánchez MD, Rosales-Méndez M. (eds.), *Agroforestería para la producción animal en América Latina -II- memorias de la segunda conferencia electrónica*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/Y4435S/y4435s0h.htm#bm17> (Recuperado: marzo 2022).
- Delgado H, Ramírez L. 2008. Árboles y arbustos forrajeros como alternativa alimenticia para la ganadería bovina y su impacto sobre la productividad animal. In *Desarrollo sostenible de la ganadería doble propósito*. González C, Soto E. (eds.). Ediciones Astro Data S.A.: Maracaibo, Venezuela. 385 p.
- Egea AV, Allegretti L, Paez LS, Grilli D, Sartor C, Fucili M, Guevara JC, Passera C. 2014. Selective behavior of creole goats in response to the functional heterogeneity of native forage species in the Central Monte Desert, Argentina. *Small Ruminant Research* 120 (1): 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.04.005>
- Franco-Guerra FJ, Sánchez RM, Camacho RJC, Hernández HJE, Villarreal EBOA, Rodríguez CEL, Marcito AO. 2014. Consumo de especies arbóreas, arbustivas y sus frutos y herbáceas por cabras en pastoreo trashumante en la Mixteca Oaxaqueña, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 17 (2): 267–270.
- García-Fragoso AL, Guerrero-Rodríguez J de D, Ortiz-Torres E, Rosas-Rosas OC, Quero-Carrillo AR. 2021. Comportamiento de la diversidad arbórea-arbustiva en zonas de pastoreo en un área natural protegida del trópico seco poblano. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8 (2): 1–13. <https://doi.org/10.19136/era.a8nii.2879>.
- García-Mendoza AJ, Ordóñez M de J, Briones-Salas M. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México, México. 605 p.
- García E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Quinta edición). Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México, México. 97 p.
- Guerrero-Arenas R, Jiménez-Hidalgo E, Santiago-Romero H. 2010. La transformación de los ecosistemas de la Mixteca Alta Oaxaqueña desde el pleistoceno tardío hasta el holoceno. *Ciencia y Mar* 14 (40): 61–68.
- Hernández HJH, Franco GFJ, Villareal EO, Aguilar GLM, Sorcia CMG. 2008. Identificación y preferencia de especies arbóreo-arbustivas y sus partes consumidas por el ganado caprino en la Mixteca Poblana, Tehuaxtla y Maninalcingo, México. *Zootecnia Tropical* 26 (3): 379–382.
- Jiménez-Ferrer G, López-Carmona M, Nahed-Toral J, Ochoa-Gaona S, Jong B. 2008. Árboles y arbustos forrajeros de la región Norte-Tzotzil de Chiapas, México. *Veterinaria México* 39 (2): 199–213.
- Lira-Noriega A, Guevara S, Laborde J, Sánchez-Ríos G. 2007. Composición florística en potreros de Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Acta Botánica Mexicana* 80: 59–87.
- Mancilla-Leytón JM, Joffre R, Martín VA. 2014. Effect of grazing and season on the chemical composition of Mediterranean shrub species in Doñana Natural Park, Spain. *Journal of Arid Environments* 108: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.04.007>

- Mandujano S, Barrera-Salazar A, Vergara-Castrejón A. 2019. Similitud de especies de plantas consumidas por rebaños de cabras en el bosque tropical seco de La Cañada, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 10 (2): 490–505. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i2.4370>
- Muñoz-González J, Huerta-Bravo M, Lara-Bueno A, Rangel-Santos R, Rosa-Arana JL. 2016. Producción y calidad nutrimental de forrajes en condiciones del trópico húmedo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (16): 3315–3327.
- Ortiz-Morales O, Arias-Margarito L, López-Ojeda JC, Soriano-Roble R, Almaraz-Buendía I, Ramírez-Bribiesca E. 2021. Estudio descriptivo de la producción caprina tradicional en las regiones Mixteca y Valles Centrales de Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8 (2): 1–13. <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2840>
- Ouédraogo-Koné S, Kaboré-Zoungrana CY, Ledin I. 2006. Behaviour of goats, sheep and cattle on natural pasture in the sub-humid zone of West Africa. *Livestock Science* 105 (1–3): 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.06.010>
- Pinto-Ruiz R, Hernández D, Gómez H, Cobos MA, Quiroga R, Pezo D. 2010. Árboles forrajeros de tres regiones ganaderas de Chiapas, México: usos y características nutricionales. *Universidad y Ciencia* 26 (1): 19–31.
- Quero-Carrillo AR, Villanueva-Ávalos JF, Morales-Nieto CR, Enríquez-Quiroz JF, Bolaños-Aguilar ED, Castillo-Huchim J, Maldonado-Méndez J de J, Herrera-Cedano F. 2012. Manual de evaluación de recursos genéticos de gramíneas y leguminosas forrajeras. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias: Ciudad de México, México. <https://doi.org/10.13140/2.1.4642.8481>
- Ramos-Trejo O, Canul-Solis JR, Ku-Vera JC. 2016. Forage yield of *gliricidia sepium* as affected by harvest height and frequency in Yucatan, Mexico. *Revista Bio Ciencias* 4 (2): 116–23. <https://doi.org/10.15741/revbio.04.02.04>
- Reyes-Santiago J. 2012. Lista florística de la Mixteca Oaxaqueña. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas: Oaxaca, México. 32 p.
- Salgado-Beltrán VA, Murillo-Amador B, Nieto-Garibay A, Aguilera N, Ortega-Pérez R. 2020. Especies consumidas por cabras en la Sierra La Laguna, Baja California Sur. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 7 (3): 1–15.
- Savadogo P, Sawadogo L, Tiveau L. 2007. Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 (1–4): 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.002>
- SMN (Sistema Meteorológico Nacional). 2022. Normales climatológicas por estado, Oaxaca. Sistema Meteorológico Nacional-CONAGUA. México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=oax>
- Tilley JMA, Terry RA. 1963. A Two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. *Grass and Forage Science* 18 (2): 104–111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>
- Van Soest PJ, Wine RH. 1967. Use of detergent in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell wall constituents. *Journal of Association of Official Analytical Chemists* 50 (1): 50–55. <https://doi.org/10.1093/jaoac/50.1.50>

# IDENTIFICACIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE RECURSOS FORRAJEROS CONSUMIDOS POR CAPRINOS EN LA MIXTECA DE OAXACA, MÉXICO

Jacinto Efrén **Ramírez-Bribiesca**<sup>1</sup>, José Carlos **López-Ojeda**<sup>1\*</sup>, Ramón **Robles-Soriano**<sup>2</sup>,  
Serafín Jacobo **López-Garrido**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Ganadería. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Departamento de Biología de la Reproducción. Avenida San Rafael Atlixco 186, Colonia Vicentina, Delegación Iztapalapa, Ciudad de México, México. C. P. 09340.

<sup>3</sup> Universidad del Mar Campus Puerto Escondido. Carretera Vía Sola de Vega-Puerto Escondido, San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, México. C. P. 71980.

\* Autor para correspondencia: jclo\_86@hotmail.com

## RESUMEN

La región Mixteca de Oaxaca, México, se caracteriza por la cría de ganado caprino en pastoreo extensivo de una variedad amplia de pastos, arbustos y árboles. El objetivo de este trabajo fue identificar y determinar la materia seca (MS), materia orgánica (MO), proteína cruda, fibra detergente neutro (FDN) y degradabilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) de las especies consumidas por caprinos en la región Mixteca, Oaxaca. Se utilizó el método de observación directa para la recolección de forraje de las especies durante el periodo de lluvia (agosto–septiembre) y sequía (abril–mayo); además, se hizo una colecta botánica para su posterior identificación. Las variables consideradas fueron el periodo (lluvia, sequía) y el hábito de crecimiento (árbol, arbusto, herbácea, vaina) como tratamientos. Los valores de la composición química se analizaron con un diseño experimental completamente al azar. Se identificaron 116 especies, de las cuales el 74 % se encontraron en el periodo de lluvia y 26 % en el de sequía. Por hábito de crecimiento, el 42 % fueron árboles, 34 % arbustos y 24 % herbáceas. Además, 11 % del total de las especies proveyeron vainas que fueron consumidas por los caprinos. La familia Fabaceae fue la de mayor representación. En cuanto a la composición química, el contenido de FDN de las especies fue mayor ( $p \leq 0.05$ ) en el periodo de lluvia. Por hábito de crecimiento, los mayores valores obtenidos ( $p \leq 0.05$ ) para MS fueron en herbáceas y vainas; para MO, en vainas; de FDN, en vainas y árboles; y para DIVMS, en árboles, arbustivas y vainas. El ganado caprino de la región Mixteca en Oaxaca tiene un nicho ecológico importante. Las especies evaluadas mantienen una composición química variable entre los periodos de lluvia y sequía.

**Palabras clave:** pastoreo, cabras, árbol, arbustiva, herbácea, composición química.

**Citation:** Ramírez-Bribiesca JE, López-Ojeda JC, Robles-Soriano R, López-Garrido sF. 2023. Identificación y composición química de recursos forestales consumidos por caprinos en la Mixteca de Oaxaca, México.

Agrociencia 57(3): 454-475.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2917>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 30, 2022.  
Approved: February 28, 2023.  
**Published in Agrociencia:**  
April 20, 2023.

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



## INTRODUCCIÓN

La cría de ganado caprino tiene fuerte arraigo en la región Mixteca. Su alimentación se basa principalmente en el pastoreo y ramoneo de árboles, arbustos y herbáceas, que

se localizan en extensiones grandes de terreno consideradas zonas de biodiversidad abundante (García-Mendoza *et al.*, 2004). Se trata de sistemas a escala pequeña, con mano de obra familiar y prácticas de sanidad mínimas (Arias *et al.*, 2014). El producto principal de la caprinocultura en la zona es el animal adulto, por lo que su condición corporal es el factor que determina el precio de venta (Ortiz-Morales *et al.*, 2021).

Uno de los problemas que se han señalado en los diagnósticos regionales de la producción de caprinos es su productividad limitada. Esto se debe a que la producción de biomasa de las plantas consumidas varía a través del año, por lo que en épocas húmedas existe variedad y disponibilidad para los caprinos, mientras que en la época seca sucede lo contrario, ocasionando un ciclo de pérdida-ganancia de peso. Los estudios acerca del aprovechamiento de los recursos naturales para la producción caprina en la Mixteca oaxaqueña son aislados (Arias *et al.*, 2014; Franco-Guerra *et al.*, 2014). Se reporta que el contenido de proteína cruda (PC) de árboles y arbustivas generalmente duplica al de gramíneas. Además, los valores de fibra detergente neutro (FDN) entre 20 y 35 % tienen valores altos de digestibilidad *in vitro* de materia seca (DIVMS) (Delgado y Ramírez, 2008).

Por lo anterior, se planteó como hipótesis que la calidad nutritiva de las especies consumidas por las cabras durante el pastoreo varía de acuerdo a la época del año, el hábito de crecimiento y la comunidad. El objetivo del presente estudio fue identificar y determinar la composición química de las plantas consumidas por el ganado en pastoreo durante el periodo de sequía y lluvia en la región Mixteca de Oaxaca.

## MATERIALES Y MÉTODOS

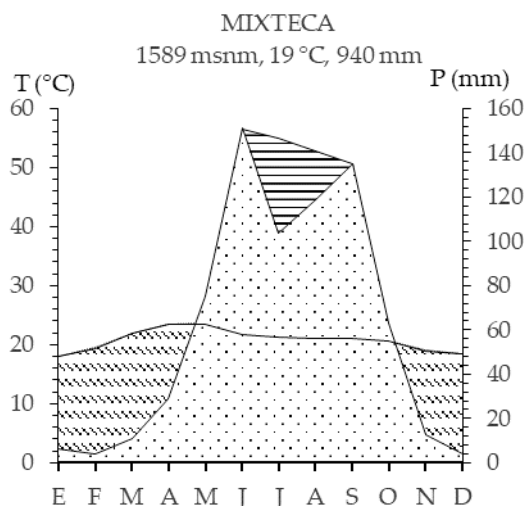
### Área de estudio

El trabajo se realizó en cinco localidades (Chocani, CHO; Guadalupe Cuautepec, GC; Guadalupe La Huertilla, GH; San Marcos Arteaga, SMA; y Santa María Tindú, SMT) de la región Mixteca del estado de Oaxaca (17° 48' 00" N, 97° 46' 00" O), ubicadas en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur que mantiene estribaciones con altitudes entre 1000 y 2700 m. Los climas son semicálido subhúmedo (A)C(w2), (A)C(w1), (A)C(w0) y templado subhúmedo C(w2), C(w1), C(w0) (García, 2004). La temperatura oscila entre 16 y 26 °C, mientras que la precipitación fluctúa de 628 a 742 mm. La Figura 1 se elaboró a partir de las normales climatológicas consultadas en el Servicio Meteorológico Nacional durante el periodo 1951-2010 para los municipios de Huajuapam de León, Mariscal de Juárez, Tamazulápam del progreso y Tezoatlán de Segura y Luna (SMN, 2022).

Los tipos de vegetación representativos son matorral espinoso, selva baja caducifolia y bosque de encino.

### Muestreo

En cada comunidad se impartieron talleres participativos con productores caprinos interesados en el estudio. Los talleres se realizaron durante el periodo de lluvia (agosto-septiembre) y sequía (abril-mayo) para conocer las rutas de pastoreo que habitualmente



**Figura 1.** Diagrama ombrotérmico de la región Mixteca. En la parte superior se observan los promedios de altitud, temperatura y precipitación. Las temperaturas mayores se registran de marzo a mayo, periodo considerado de mayor sequía. Se presentan precipitaciones intensas en junio y septiembre, registrando una sequía intraestival en julio.

recorren los productores con sus rebaños. En cada comunidad se siguieron dos rutas distintas: trashumante y no trashumante (Ortiz-Morales *et al.*, 2021), las cuales se recorrieron durante 6 días. Cada jornada de pastoreo duró 8 horas por día. Las hojas y tallos fueron las partes muestreadas de las plantas que se consideraron como forraje consumido por las cabras. Se colectaron 500 g de forraje o vainas de árboles, arbustos y herbáceas; las muestras se procesaron para su posterior análisis en laboratorio. Para el muestreo del forraje se utilizó el método de observación directa (Arias *et al.*, 2014; Mandujano *et al.*, 2019), durante el pastoreo se observó a un animal al azar por lapsos de un minuto para conocer las especies que consumían, los nombres de cada una fueron proporcionado por los productores. Además, se recolectó por triplicado ejemplares de cada planta para su posterior identificación botánica. Se colectaron 182 muestras (35 en CHO, 45 en SMT, 30 en GH, 30 en GC y 42 en SMA) durante ambos periodos.

#### Composición química y degradabilidad

La materia seca (MS), materia orgánica (MO) y PC fueron determinadas a lo establecido por la asociación de químicos agrícolas oficiales (AOAC, 2000), mientras que la FDN se evaluó a lo referido por Van Soest y Wine (1967). La DIVMS se determinó con el método descrito por Tilley y Terry (1963).

#### Análisis estadístico

Considerando el periodo (lluvia, sequía), el hábito de crecimiento (árbol, arbusto, herbácea, vaina) y las comunidades (CHO, GC, GH, SMA, SMT) como tratamientos

(Cabrera-Núñez, *et al.*, 2019), la concentración de MS, MO, PC, FDN, DIVMS se comparó con un diseño experimental completamente al azar usando el procedimiento GLM, además de una prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para la comparación de medias con el paquete estadístico SAS (2002). El modelo utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + P_k + G_j + C_i + CG_{ij} + CP_{ik} + GP_{jk} + e_{ijk}$$

donde  $Y_{ijk}$  es la variable dependiente;  $\mu$ , el efecto de la media general;  $P_k$ , el efecto del periodo;  $H_j$ , el efecto del hábito de crecimiento;  $C_i$ , el efecto de la comunidad;  $CH_{ij}$ , el efecto de la interacción entre comunidad y hábito de crecimiento;  $CP_{ik}$ , el efecto de la interacción entre comunidad y periodo;  $HP_{jk}$ , el efecto de la interacción entre hábito de crecimiento y periodo; y  $e_{ijk}$ , el efecto del error experimental.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Identificación de especies

Un total de 116 especies fueron identificadas botánicamente, 86 en el periodo de lluvia y 30 en sequía; además, 18 estuvieron presentes en ambos periodos (Cuadro 1). Del total, 57 % corresponden a las familias Fabaceae, Asteraceae y Fagaceae. En cuanto al hábito de crecimiento el 42 % fueron árboles, 34 % arbustos y 24 % herbáceas. Adicionalmente, 6 árboles y 7 arbustivas produjeron vainas en distinto periodo (9 en lluvia y 4 en sequía).

**Cuadro 1.** Valores medios de materia seca, materia orgánica, proteína cruda, fibra detergente neutro y digestibilidad *in vitro* de la materia seca por especie, familia, periodo y hábito de crecimiento.

Especie	Familia	Periodo	Comunidad	HC	MS	MO	PC	FDN	DIVMS
<i>Quercus</i> sp.	Fagaceae	Lluvia	CHO, SMT, SMA	AO	46.4	91.4	8.9	53.3	79.5
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Fabaceae	Lluvia	CHO, SMT, SMA, GC	AO	49.3	88.7	15.2	50.4	69.5
<i>Heliocarpus americanus</i>	Tiliaceae	Lluvia	GH, SMT, SMA	AO	62.8	86.1	11.0	44.9	62.3
<i>Bursera aspleniifolia</i> Brandege	Burseraceae	Lluvia	GH, GC	AO	47.9	83.2	11.2	46.0	70.8
<i>Leucaena leucocephala</i>	Fabaceae	Lluvia	GH, SMA	AO	58.0	88.8	11.7	39.1	62.6
<i>Prosopis laevigata</i>	Fabaceae	Lluvia	CHO, GH	AO	50.8	88.5	21.0	42.3	73.8
<i>Lysiloma acapulcense</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT, GC	AO	54.2	90.9	12.5	55.3	75.7
<i>Lysiloma divaricatum</i>	Fabaceae	Lluvia	GH, SMA	AO	52.8	92.9	14.6	38.8	68.7
<i>Bursera glabrifolia</i>	Burseraceae	Lluvia	SMT, GC	AO	54.9	80.6	10.9	42.4	70.1
<i>Bursera áptera</i>	Burseraceae	Lluvia	SMT, SMA	AO	47.3	87.8	10.3	43.2	73.2
<i>Fraxinus purpusii</i>	Oleaceae	Lluvia	SMT, SMA	AO	46.6	91.1	8.0	36.9	73.3
<i>Acacia bilimekii</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT, GC	AO	38.5	89.5	11.7	49.7	68.6
<i>Quercus acutifolia</i>	Fagaceae	Lluvia	GC	AO	46.8	92.1	9.9	55.5	73.4
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	Rosaceae	Lluvia	GC	AO	49.2	87.4	8.3	42.6	65.5
<i>Quercus sebifera</i>	Fagaceae	Lluvia	CHO	AO	40.4	90.8	7.3	51.9	88.8
<i>Cupressus</i> sp.	Cupressaceae	Lluvia	SMT	AO	56.3	92.6	8.1	50.1	85.3
<i>Pinus</i> sp.	Pinaceae	Lluvia	SMT	AO	52.9	93.5	5.2	65.6	84.9

**Cuadro 1.** Continúa

Especie	Familia	Periodo	Comunidad	HC	MS	MO	PC	FDN	DIVMS
<i>Actinocheita potentillifolia</i>	Anacardiaceae	Lluvia	SMT	AO	52.4	85.6	10.1	39.9	70.2
<i>Quercus magnoliifolia</i>	Fagaceae	Lluvia	SMT	AO	49.1	92.6	8.3	47.0	80.8
<i>Acacia coulteri</i>	Fabaceae	Lluvia	GH	AO	50.0	88.0	16.2	34.8	70.6
<i>Saurauia aspera</i>	Actinidiaceae	Lluvia	CHO	AO	47.8	88.9	7.8	19.9	84.1
<i>Gliricidia sepium</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA	AO	52.4	86.0	16.0	44.5	57.6
<i>Lysiloma tergeminum</i>	Fabaceae	Lluvia	GH	AO	50.3	90.7	11.8	47.2	69.7
<i>Bunchosia lindeniana</i>	Malpighiaceae	Lluvia	SMA	AO	45.2	88.7	5.4	45.0	67.4
<i>Casimiroa</i> sp.	Rutaceae	Lluvia	SMT	AO	55.6	85.2	13.4	39.5	63.4
<i>Acacia pennatula</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT	AO	51.3	92.6	12.4	58.9	88.2
<i>Quercus glaucooides</i>	Fagaceae	Lluvia	GC	AO	49.8	90.2	10.8	53.7	65.2
<i>Bursera fagaroides</i>	Burseraceae	Lluvia	SMA	AO	53.5	86.0	9.1	16.4	53.7
<i>Quercus rugosa</i>	Fagaceae	Lluvia	SMT	AO	42.0	93.6	6.3	66.8	83.3
<i>Leucaena macrophylla</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT	AO	62.6	91.1	19.0	61.5	81.9
<i>Cercocarpus betuloides</i>	Rosaceae	Lluvia	CHO	AO	49.2	89.8	9.9	40.5	78.0
<i>Leucaena</i> sp.	Fabaceae	Lluvia	CHO	AO	51.5	90.3	9.4	41.9	84.0
<i>Thevetia thevetioides</i>	Apocynaceae	Lluvia	GH	AO	66.8	84.3	10.4	42.9	60.3
<i>Bursera linanoe</i>	Burseraceae	Lluvia	GH	AO	54.9	81.5	9.1	49.6	62.1
<i>Haematoxylon brasiletto</i>	Fabaceae	Lluvia	GH	AO	46.1	85.2	11.1	33.1	66.4
<i>Acacia cochliacantha</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT, SMA, GH, GC	AU	46.9	90.2	13.6	46.1	76.8
<i>Dodonaea viscosa</i>	Sapindaceae	Lluvia	SMT, GC, SMA	AU	60.1	88.6	10.0	36.2	67.4
<i>Rhus standleyi</i>	Anacardiaceae	Lluvia	SMT, CHO	AU	43.3	92.3	5.8	40.7	80.2
<i>Mimosa fasciculata</i>	Fabaceae	Lluvia	GC, SMA	AU	49.4	91.8	11.6	52.5	70.5
<i>Karwinskia humboldtiana</i>	Rhamnaceae	Lluvia	SMA	AU	55.2	86.4	8.8	49.0	66.3
<i>Amelanchier denticulata</i>	Rosaceae	Lluvia	CHO, GC	AU	38.0	89.1	6.1	39.8	72.4
<i>Mimosa polyantha</i>	Fabaceae	Lluvia	GH	AU	48.3	82.4	14.1	27.7	56.2
<i>Acacia farnesiana</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA	AU	46.8	88.9	22.9	46.5	62.0
<i>Acacia angustissima</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT, CHO	AU	47.6	84.6	14.6	29.7	87.2
<i>Zanthoxylum liebmanniana</i>	Rutaceae	Lluvia	SMT, SMA	AU	52.8	86.1	11.4	27.2	47.5
<i>Acacia schaffneri</i>	Fabaceae	Lluvia	CHO	AU	37.4	90.6	17.0	47.7	86.4
<i>Cercocarpus</i> sp.	Rutaceae	Lluvia	SMT	AU	52.5	93.3	9.4	46.6	80.2
<i>Desmodium orbiculare</i>	Fabaceae	Lluvia	CHO	AU	52.4	86.5	13.8	37.3	80.8
<i>Pithecellobium acatlense</i>	Fabaceae	Lluvia	GH	AU	46.4	89.5	14.5	49.6	81.0
<i>Bourreria obovata</i>	Boraginaceae	Lluvia	GH	AU	42.9	77.7	7.3	38.1	67.5
<i>Cassia pringlei</i>	Caesalpinaceae	Lluvia	GH	AU	57.5	79.0	11.4	32.7	65.0
<i>Brongniartia benthamiana</i>	Fabaceae	Lluvia	GC	AU	62.0	84.4	10.4	36.8	54.4
<i>Pisonia macranthocarpa</i>	Nyctaginaceae	Lluvia	GH	AU	60.1	81.1	16.7	55.1	75.7
<i>Gagnebina</i> sp.	Fabaceae	Lluvia	GH	AU	52.1	84.1	12.9	34.8	62.9
<i>Rhus oaxacana</i>	Anacardiaceae	Lluvia	SMT	AU	53.3	93.9	7.4	46.7	74.9
<i>Garrya ovata</i>	Garryaceae	Lluvia	CHO	AU	41.9	89.2	5.6	48.4	79.6
<i>Tecoma stans</i>	Bignoniaceae	Lluvia	GC	AU	38.6	88.6	6.5	40.0	51.5
<i>Caesalpinia melanadenia</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA	AU	48.4	88.4	14.2	48.2	81.3
<i>Lindleya mespiloides</i>	Rosaceae	Lluvia	CHO	AU	48.2	88.6	7.3	31.7	75.3
<i>Forestiera phillyreoides</i>	Oleaceae	Lluvia	SMA	AU	50.9	89.6	6.9	37.8	74.9
<i>Forestiera rotundifolia</i>	Oleaceae	Lluvia	SMT	AU	72.2	81.4	12.8	52.2	62.7
<i>Dalea greggii</i>	Fabaceae	Lluvia	GC, CHO	HE	55.8	89.6	10.6	48.6	77.7
<i>Cosmos sulphureus</i>	Asteraceae	Lluvia	SMT, SMA	HE	69.6	88.6	11.2	46.6	64.5
<i>Montanoa</i> sp.	Asteraceae	Lluvia	SMT, SMA	HE	60.1	81.8	10.7	41.5	65.3
<i>Rhynchelytrum repens</i>	Poaceae	Lluvia	GC, SMA	HE	64.8	88.5	3.8	74.8	57.4

**Cuadro 1.** Continúa

Especie	Familia	Periodo	Comunidad	HC	MS	MO	PC	FDN	DIVMS
<i>Macroptilium gibbosifolium</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA	HE	61.1	92.7	10.9	58.9	60.3
<i>Montanoa tomentosa</i>	Asteraceae	Lluvia	CHO	HE	65.9	82.2	19.6	35.5	74.7
<i>Montanoa leucantha</i>	Asteraceae	Lluvia	GC	HE	47.4	80.4	19.7	30.5	51.9
<i>Calea zacatechichi</i>	Asteraceae	Lluvia	SMT	HE	63.1	84.7	11.8	31.9	68.8
<i>Tagetes erecta</i>	Asteraceae	Lluvia	SMA	HE	62.8	89.3	10.8	44.9	54.8
<i>Dalea foliolosa</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT	HE	60.5	86.2	9.4	49.9	77.0
<i>Bidens anthemoides</i>	Asteraceae	Lluvia	SMA	HE	63.5	74.2	18.4	25.5	60.4
<i>Porophyllum ruderales</i>	Asteraceae	Lluvia	CHO	HE	69.9	76.0	11.3	22.3	68.7
<i>Chamaecrista nictitans</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA	HE	59.9	93.5	13.4	49.8	70.7
<i>Calea ternifolia</i>	Asteraceae	Lluvia	GC	HE	63.3	83.7	11.3	35.7	58.8
<i>Cissus</i> sp.	Vitaceae	Lluvia	GH	HE	66.9	87.3	14.0	41.3	60.5
<i>Salvia lasiantha</i>	Lamiaceae	Lluvia	CHO	HE	68.0	79.9	20.5	27.5	67.3
<i>Rhynchosia minima</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT	HE	66.7	85.4	13.7	29.8	67.1
<i>Dalea mutabilis</i>	Fabaceae	Lluvia	GC	HE	53.7	88.3	14.6	45.5	29.6
<i>Salvia sessei</i>	Lamiaceae	Lluvia	SMT	HE	62.0	88.9	9.7	34.7	83.4
<i>Desmodium angustifolium</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT	HE	69.4	89.0	12.3	55.0	68.9
<i>Tithonia</i> sp.	Asteraceae	Lluvia	SMT	HE	76.6	79.2	12.6	33.0	69.7
<i>Gonolobus</i> sp.	Apocynaceae	Lluvia	GH	HE	68.6	75.1	17.7	27.3	51.0
<i>Bidens pilosa</i>	Asteraceae	Lluvia	SMA	HE	59.7	86.3	11.3	35.8	68.4
<i>Mimosa albida</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA	HE	61.3	90.5	13.5	51.8	68.7
<i>Montanoa hibiscifolia</i>	Asteraceae	Lluvia	SMA	HE	48.9	82.2	15.0	32.5	60.3
<i>Quercus</i> sp.	Fagaceae	Sequía	SMT, SMA	AO	54.6	91.0	10.3	44.5	75.9
<i>Cupressus</i> sp.	Cupressaceae	Sequía	SMT, GC	AO	44.8	89.9	6.3	42.0	75.7
<i>Lysiloma acapulcense</i>	Fabaceae	Sequía	SMT, GC	AO	52.2	89.2	10.6	45.5	78.8
<i>Quercus magnoliifolia</i>	Fagaceae	Sequía	SMT	AO	54.6	92.5	7.3	40.6	74.5
<i>Pseudosmodium multifolium</i>	Anacardiaceae	Sequía	SMT	AO	49.1	92.0	10.3	36.4	67.6
<i>Acacia pennatula</i>	Fabaceae	Sequía	SMT	AO	50.8	90.7	13.5	50.0	80.7
<i>Ficus</i> sp.	Moraceae	Sequía	GH	AO	70.7	84.2	16.4	49.1	61.5
<i>Quercus glaucooides</i>	Fagaceae	Sequía	GC	AO	47.8	91.3	9.7	46.6	80.7
<i>Salix bonplandiana</i>	Salicaceae	Sequía	CHO	AO	58.1	87.6	16.0	33.4	70.4
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	Rosaceae	Sequía	GC	AO	39.8	87.2	8.0	36.6	69.7
<i>Thevetia thevetioides</i>	Apocynaceae	Sequía	GH	AO	36.6	82.3	4.9	26.7	65.1
<i>Pinus</i> sp.	Pinaceae	Sequía	SMT	AO	51.9	91.5	5.7	58.1	82.1
<i>Acacia bilimekii</i>	Fabaceae	Sequía	GC	AO	38.2	89.1	13.6	46.7	81.2
<i>Mimosa benthamii</i>	Fabaceae	Sequía	GH	AO	50.8	89.3	23.4	36.6	61.6
<i>Acacia farnesiana</i>	Fabaceae	Sequía	CHO, GC, SMT, SMA	AU	46.5	87.2	22.1	43.4	65.0
<i>Tecoma stans</i>	Bignoniaceae	Sequía	CHO, GC	AU	56.3	87.4	13.4	33.6	54.5
<i>Acacia cochliacantha</i>	Fabaceae	Sequía	GC, SMA	AU	53.5	89.6	25.8	45.3	78.2
<i>Pistacia mexicana</i>	Anacardiaceae	Sequía	CHO	AU	51.3	91.1	11.1	30.8	60.4
<i>Acacia schaffneri</i>	Fabaceae	Sequía	CHO	AU	41.4	90.1	17.4	54.1	74.1
<i>Rhus oxacana</i>	Anacardiaceae	Sequía	CHO	AU	54.3	91.3	7.5	32.9	76.4
<i>Cassia mexicana</i>	Fabaceae	Sequía	CHO	AU	50.0	85.9	13.6	28.4	63.5
<i>Pisonia macranthocarpa</i>	Nyctaginaceae	Sequía	GH	AU	66.0	82.9	23.4	51.6	50.8
<i>Dodonaea viscosa</i>	Sapindaceae	Sequía	GC	AU	45.8	87.3	6.9	23.2	76.1
<i>Rhus chondroloma</i>	Anacardiaceae	Sequía	CHO	AU	50.0	86.7	8.1	33.4	75.2
<i>Baccharis pteronioides</i>	Asteraceae	Sequía	CHO	AU	50.0	90.5	10.0	37.1	78.7
<i>Baccharis salicifolia</i>	Asteraceae	Sequía	CHO	AU	58.1	86.0	17.1	23.4	66.9
<i>Mimosa fasciculata</i>	Fabaceae	Sequía	GC	AU	55.4	88.7	16.2	47.9	75.1

**Cuadro 1.** Continúa

Especie	Familia	Periodo	Comunidad	HC	MS	MO	PC	FDN	DIVMS
<i>Mimosa calcicola</i>	Fabaceae	Sequía	CHO	AU	48.8	89.9	19.3	42.3	71.7
<i>Dalea filiciformis</i>	Fabaceae	Sequía	CHO	HE	53.1	88.4	13.9	29.1	67.6
<i>Senecio salignus</i>	Asteraceae	Sequía	CHO	HE	71.7	83.3	17.7	21.4	59.6
<i>Gymnosperma glutinosum</i>	Asteraceae	Sequía	CHO	HE	54.1	88.7	9.3	29.7	77.1
<i>Lysiloma divaricatum</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA, GH	VA	66.6	92.0	12.4	45.1	63.1
<i>Acacia cochliacantha</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA, SMT	VA	68.0	93.7	6.4	71.3	79.9
<i>Mimosa polyantha</i>	Fabaceae	Lluvia	GH	VA	61.3	89.2	19.5	51.1	59.5
<i>Acacia angustissima</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT	VA	64.0	93.3	17.6	52.8	70.4
<i>Mimosa fasciculata</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA	VA	63.5	93.5	9.4	66.2	72.7
<i>Acacia pennatula</i>	Fabaceae	Lluvia	SMT	VA	59.5	94.9	6.6	71.5	86.0
<i>Pithecolobium acatlense</i>	Fabaceae	Lluvia	GH	VA	61.9	93.1	15.0	52.2	72.1
<i>Gliricidia sepium</i>	Fabaceae	Lluvia	SMA	VA	58.6	89.2	17.6	42.8	56.5
<i>Haematoxylon brasiletto</i>	Fabaceae	Lluvia	GH	VA	60.6	91.5	10.5	46.9	65.2
<i>Acacia farnesiana</i>	Fabaceae	Sequía	CHO, SMA	VA	9.0	89.3	13.2	27.5	53.5
<i>Acacia schaffneri</i>	Fabaceae	Sequía	CHO	VA	61.5	91.2	11.1	22.8	64.4
<i>Prosopis laevigata</i>	Fabaceae	Sequía	SMA	VA	43.9	90.5	10.6	44.3	56.6
<i>Mimosa benthamii</i>	Fabaceae	Sequía	GH	VA	53.4	90.7	18.0	46.7	59.9

MS: materia seca en %; MO: materia orgánica en %; PC: proteína cruda en %; FDN: fibra detergente neutro en %; DIVMS: digestibilidad *in vitro* de la materia seca en %; CHO: Chocani; GC: Guadalupe Cuauhtepic; GH: Guadalupe La Huertilla; SMA: San Marcos Arteaga; SMT: Santa María Tindú; HC: hábito de crecimiento; AO: árbol; AU: arbustiva; HE: herbácea; VA: vaina.

La Mixteca se cataloga como una de las regiones con mayor biodiversidad debido a que su cubierta vegetal es heterogénea. A pesar de esto, son pocos los trabajos que sistematizan la información de la riqueza florística (García-Mendoza *et al.*, 2004; Reyes-Santiago, 2012). El conocimiento acerca de la estructura, composición y diversidad florística de las áreas de pastoreo resulta básico para tomar decisiones sobre el manejo sostenible de estos recursos naturales (Lira-Noriega *et al.*, 2007). El número total de especies identificadas en el presente estudio es superior a lo reportado por Arias *et al.* (2014) y Franco-Guerra *et al.* (2014) en la misma región. Cabe mencionar que éstos son los únicos trabajos que presentan información acerca del aprovechamiento de especies forestales consumidas por el ganado caprino en la zona de estudio. Esta caracterización de especies podría ser considerada para el establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles o para programas de reforestación en la región, considerando que el territorio de la Mixteca presenta erosión elevada (Guerrero-Arenas *et al.*, 2010). La familia Fabaceae es también descrita en otras partes del país como la de mayor importancia por el número de especies que aprovechan los caprinos (Hernández *et al.*, 2008; Salgado-Beltrán *et al.*, 2020; García-Fragoso *et al.*, 2021). A nivel mundial, México es el segundo país con mayor diversidad de plantas para esta familia, donde se pueden encontrar desde enredaderas y herbáceas hasta arbustos y árboles, los cuales son importantes en la alimentación de rumiantes por el contenido elevado de proteína en su follaje (Pinto-Ruiz *et al.*, 2010) o frutos (Arias *et al.*, 2014).

### Composición química y degradabilidad

La PC, FDN y DIVMS oscilaron entre 23.4–3.8, 74.8–16.4 y 87.2–47.5 % por periodo y hábito de crecimiento, respectivamente (Cuadro 1). Del total de especies, el 65 y 88 % tuvieron concentraciones de PC y DIVMS mayores a 10 y 60 %, respectivamente, mientras que el 96 % mantuvo valores menores a 60 % de FDN (Cuadro 1). A pesar de la variedad extensa de especies forrajeras, su establecimiento y aprovechamiento ha sido bajo y limitado a algunas especies (Ayala-Burgos *et al.*, 2006; Barrientos-Ramírez *et al.*, 2012). En este sentido, se sugiere estudiar y recomendar especies con potencial forrajero para uso en la alimentación en función de su densidad, productividad de biomasa (Ramos-Trejo *et al.*, 2016) y valor nutritivo para entornos agro-ecológicos (Jiménez-Ferrer *et al.*, 2008; Quero-Carrillo *et al.*, 2012) y sistemas de producción pecuaria específicos (Arias *et al.*, 2014; Franco-Guerra *et al.*, 2014).

Por otro lado, los porcentajes de MS, MO, PC y DIVMD no fueron diferentes entre periodos ( $p \geq 0.05$ ) (Cuadro 2). Sin embargo, durante el periodo de lluvia la concentración de FDN fue mayor ( $p \leq 0.05$ ), lo cual ha sido reportado ya en forrajes del trópico húmedo en Chiapas (Muñoz-González *et al.*, 2016). La variación de FDN entre periodos se debe a que durante la sequía las especies muestreadas se mantenían en etapa de rebrote, cuando es menor la proporción de la pared secundaria. Especies vegetales en etapa fisiológica de rebrote o floración tienen mayor probabilidad de ser consumidas por cabras en pastoreo pues su valor nutritivo es mayor (Mancilla-Leytón *et al.*, 2014). Además, una alta proporción de tallos o ramas en las muestras incrementa la concentración de FDN debido a que estas partes mantienen mayor proporción de carbohidratos estructurales (Cobos *et al.*, 2003).

**Cuadro 2.** Materia seca, materia orgánica, proteína cruda, fibra detergente neutro, degradabilidad *in vitro* de la materia seca por periodo, hábito de crecimiento y comunidad.

	N	MS	MO	PC	FDN	DIVMS
<b>Periodo</b>						
Lluvia	136	55.7±9.1	88.1±4.2	11.9±4.8	44.9±11.6 a	68.7±10.8
Sequía	46	53.2±14.6	88.7±6.7	13.7±7.7	38.4±18.5 b	67.5±17.1
<b>Hábito de crecimiento</b>						
Árbol	99	50.1±12.1 b	88.9±5.6 b	11.3±6.4	43.1±15.4 ab	72.3±14.3 a
Arbustiva	40	50.4±13.1 b	87.6±6.1 bc	12.9±6.9	39.1±16.7 b	70.0±15.4 ab
Herbácea	27	61.5±16.7 a	85.3±7.7 c	13.8±8.9	36.4±21.2 b	64.2±19.6 b
Vaina	16	55.9±22.8 ab	91.9±10.5 a	13.2±12.1	48.0±29.1 a	65.9±26.8 ab
<b>Comunidad</b>						
Chocani	35	48.9±19.6 b	88.0±5.9	12.5±7.9 ab	35.9±16.3 b	74.6±16.9 a
Guadalupe Cuauhtepic	45	50.8±19.3 ab	87.2±5.7	11.9±10.5 ab	44.2±16.4 a	65.9±20.4 b
Guadalupe La Huertilla	30	53.8±17.6 ab	85.9±8.2	14.1±8.8 a	42.4±14.3 a	64.5±12.3 b
San Marcos Arteaga	30	54.7±14.1 a	88.7±6.5	11.9±6.8 ab	45.2±18.5 a	65.4±14.0 b
Santa María Tíndu	42	55.5±13.2 a	88.9±11.8	10.9±5.5 b	47.3±16.4 a	76.3±12.1 a

a,b,c Valores medios ± EEM por columna con letra distinta son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). MS: materia seca en %; MO: materia orgánica en %; PC: proteína cruda en %; FDN: fibra detergente neutro en %; DIVMS: digestibilidad *in vitro* de la materia seca en %.

Por hábito de crecimiento, el porcentaje de MS fue mayor ( $p \leq 0.05$ ) en herbáceas y vainas, MO en vainas, FDN en vainas y árboles, y DIVMS en árboles, arbustivas y vainas. La variación de la composición química y DIVMS entre árboles, arbustos, herbáceas y vainas puede ser causado por la diversidad de factores imperantes como altitud, precipitación, tipo de suelo y nutrientes disponibles (Savadogo *et al.*, 2007), ya que pueden actuar como moduladores de la fotosíntesis, alterando el valor nutritivo del forraje (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

Las cabras muestran capacidad de adaptación en la conducta de pastoreo modificando su comportamiento de alimentación en respuesta a la variable de la composición química del forraje durante las distintas épocas del año, debido a que pueden cambiar con facilidad entre el estrato herbáceo, arbustivo o arbóreo, o viceversa (Ouedraogo-Koné *et al.*, 2006; Armenta-Quintana *et al.*, 2011; Egea *et al.*, 2014). El porcentaje de MS, PC, FDN y DIVMS de las especies entre comunidades fue diferente ( $p \leq 0.05$ ) (Cuadro 2). La interacción periodo-hábito de crecimiento fue mayor ( $p \leq 0.05$ ) en PC y MS, mientras que la interacción periodo-comunidad fue mayor ( $p \leq 0.05$ ) en DIVMS y MS (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Efecto de la interacción entre periodo, hábito de crecimiento y comunidad sobre la concentración de materia seca, materia orgánica, proteína cruda, fibra detergente neutro y degradabilidad *in vitro* de la materia seca.

Interacción <sup>†</sup>	MS	MO	PC	FDN	DIVMS
Periodo – Hábito de crecimiento	$\leq 0.0012$	0.4183	$\leq 0.0001$	0.1108	0.5157
Periodo – Comunidad	$\leq 0.0118$	0.9502	0.6399	0.9419	$\leq 0.0001$
Periodo – Comunidad – Hábito de crecimiento	0.6697	0.8175	0.7194	0.7441	0.548

<sup>†</sup>Las variables presentaron interacción periodo-comunidad-hábito de crecimiento ( $p \leq 0.05$ ). MS: materia seca; MO: materia orgánica; PC: proteína cruda; FDN: fibra detergente neutro; DIVMS: digestibilidad *in vitro* de la materia seca.

## CONCLUSIONES

El ganado caprino de la región Mixteca en Oaxaca, México, tiene un nicho ecológico importante. El número de especies forrajeras desciende durante la sequía en las áreas de pastoreo y su composición química es variable entre el periodo de lluvia y de sequía. La recolección de vainas en época de abundancia podría ser estratégica en la alimentación caprina durante el periodo de sequía debido al contenido de proteína cruda que presentaron.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Colegio de Postgraduados y de la línea “Ganadería eficiente en bienestar sustentable, cambio climático y precisiones biotecnológicas”.

## REFERENCIAS

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2000. Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemists: Arlington, VA, USA. 771 p.
- Arias L, Soriano-Robles R, González-Esquivel CE, Sánchez E. 2014. Chemical composition and *in vitro* digestibility of fodder trees and shrubs consumed by goats in the Low Mixteca Region of Oaxaca, Mexico. *Research Journal of Biological Sciences* 9 (2): 92–97.
- Armenta-Quintana JA, Ramírez-Orduña R, Ramírez-Lozano RG. 2011. Utilización del forraje y selección de la dieta por cabras pastando en un matorral sarcocaulés en el noroeste de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 163–71. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.110>
- Ayala-Burgos A, Cetina-Góngora R, Capetillo-Leal C, Zapata-Campos C, Sandoval-Castro C. 2006. Composición química - nutricional de árboles forrajeros. *Compilación de análisis de laboratorio de nutrición animal*. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia: Mérida, México. 60 p.
- Azcón-Bieto J, Talón M. 2013. *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (Segunda edición). McGraw-Hill Interamericana de España: Barcelona, España. 669 p.
- Barrientos-Ramírez L, Vargas-Radillo JJ, Rodríguez-Rivas A, Ochoa-Ruiz HG, Navarro-Arzate F, Zorrilla J. 2012. Evaluación de las características del fruto del huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.) para su uso potencial en el curtido de pieles o alimentación animal. *Madera y Bosques* 18 (3): 23–35.
- Cabrera-Núñez A, Lammoglia-Villagomez M, Alarcón-Pulido S, Martínez-Sánchez C, Rojas-Ronquillo R, Velázquez-Jiménez S. 2019. Árboles y arbustos forrajeros utilizados para la alimentación de ganado bovino en el norte de Veracruz, México. *Abanico Veterinario* 9 (1): 1–12. <https://doi.org/10.21929/abavet2019.913>
- Cobos-Peralta MA, Mateo-Sánchez J, Trinidad-Santos A, Cetina-Alcalá V, Vargas-Hernández J. 2003. Importancia del tipo de muestra en la estimación del valor nutritivo de leguminosas y arbustivas, y potencial de un inocuo de bacterias degradadoras de aserrín en sistemas silvopastoriles. *In* Sánchez MD, Rosales-Méndez M. (eds.), *Agroforestería para la producción animal en América Latina -II- memorias de la segunda conferencia electrónica*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/Y4435S/y4435s0h.htm#bm17> (Recuperado: marzo 2022).
- Delgado H, Ramírez L. 2008. Árboles y arbustos forrajeros como alternativa alimenticia para la ganadería bovina y su impacto sobre la productividad animal. *In* Desarrollo sostenible de la ganadería doble propósito. González C, Soto E. (eds.). Ediciones Astro Data S.A.: Maracaibo, Venezuela. 385 p.
- Egea AV, Allegretti L, Paez LS, Grilli D, Sartor C, Fucili M, Guevara JC, Passera C. 2014. Selective behavior of creole goats in response to the functional heterogeneity of native forage species in the Central Monte Desert, Argentina. *Small Ruminant Research* 120 (1): 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.04.005>
- Franco-Guerra FJ, Sánchez RM, Camacho RJC, Hernández HJE, Villarreal EBOA, Rodríguez CEL, Marcito AO. 2014. Consumo de especies arbóreas, arbustivas y sus frutos y herbáceas por cabras en pastoreo trashumante en la Mixteca Oaxaqueña, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 17 (2): 267–270.
- García-Fragoso AL, Guerrero-Rodríguez J de D, Ortiz-Torres E, Rosas-Rosas OC, Quero-Carrillo AR. 2021. Comportamiento de la diversidad arbórea-arbustiva en zonas de pastoreo en un área natural protegida del trópico seco poblano. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8 (2): 1–13. <https://doi.org/10.19136/era.a8nii.2879>
- García-Mendoza AJ, Ordóñez M de J, Briones-Salas M. 2004. *Biodiversidad de Oaxaca*. Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México, México. 605 p.
- García E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (Quinta edición). Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México, México. 97 p.
- Guerrero-Arenas R, Jiménez-Hidalgo E, Santiago-Romero H. 2010. La transformación de los ecosistemas de la Mixteca Alta Oaxaqueña desde el pleistoceno tardío hasta el holoceno. *Ciencia y Mar* 14 (40): 61–68.

- Hernández HJH, Franco GFJ, Villareal EO, Aguilar GLM, Sorcia CMG. 2008. Identificación y preferencia de especies arbóreo-arbustivas y sus partes consumidas por el ganado caprino en la Mixteca Poblana, Tehuaxtla y Maninalcingo, México. *Zootecnia Tropical* 26 (3): 379–382.
- Jiménez-Ferrer G, López-Carmona M, Nahed-Toral J, Ochoa-Gaona S, Jong B. 2008. Árboles y arbustos forrajeros de la región Norte-Tzotzil de Chiapas, México. *Veterinaria México* 39 (2): 199–213.
- Lira-Noriega A, Guevara S, Laborde J, Sánchez-Ríos G. 2007. Composición florística en potreros de Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Acta Botánica Mexicana* 80: 59–87.
- Mancilla-Leytón JM, Joffre R, Martín VA. 2014. Effect of grazing and season on the chemical composition of Mediterranean shrub species in Doñana Natural Park, Spain. *Journal of Arid Environments* 108: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.04.007>
- Mandujano S, Barrera-Salazar A, Vergara-Castrejón A. 2019. Similitud de especies de plantas consumidas por rebaños de cabras en el bosque tropical seco de La Cañada, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 10 (2): 490–505. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i2.4370>
- Muñoz-González J, Huerta-Bravo M, Lara-Bueno A, Rangel-Santos R, Rosa-Arana JL. 2016. Producción y calidad nutricional de forrajes en condiciones del trópico húmedo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (16): 3315–3327.
- Ortiz-Morales O, Arias-Margarito L, López-Ojeda JC, Soriano-Roble R, Almaraz-Buendía I, Ramírez-Briebesca E. 2021. Estudio descriptivo de la producción caprina tradicional en las regiones Mixteca y Valles Centrales de Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8 (2): 1–13. <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2840>
- Ouédraogo-Koné S, Kaboré-Zoungrana CY, Ledin I. 2006. Behaviour of goats, sheep and cattle on natural pasture in the sub-humid zone of West Africa. *Livestock Science* 105 (1–3): 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.06.010>
- Pinto-Ruiz R, Hernández D, Gómez H, Cobos MA, Quiroga R, Pezo D. 2010. Árboles forrajeros de tres regiones ganaderas de Chiapas, México: usos y características nutricionales. *Universidad y Ciencia* 26 (1): 19–31.
- Quero-Carrillo AR, Villanueva-Ávalos JF, Morales-Nieto CR, Enríquez-Quiroz JF, Bolaños-Aguilar ED, Castillo-Huchim J, Maldonado-Méndez J de J, Herrera-Cedano F. 2012. Manual de evaluación de recursos genéticos de gramíneas y leguminosas forrajeras. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias: Ciudad de México, México. <https://doi.org/10.13140/2.1.4642.8481>
- Ramos-Trejo O, Canul-Solis JR, Ku-Vera JC. 2016. Forage yield of *gliricidia sepium* as affected by harvest height and frequency in Yucatan, Mexico. *Revista Bio Ciencias* 4 (2): 116–23. <https://doi.org/10.15741/revbio.04.02.04>
- Reyes-Santiago J. 2012. Lista florística de la Mixteca Oaxaqueña. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas: Oaxaca, México. 32 p.
- Salgado-Beltrán VA, Murillo-Amador B, Nieto-Garibay A, Aguilera N, Ortega-Pérez R. 2020. Especies consumidas por cabras en la Sierra La Laguna, Baja California Sur. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 7 (3): 1–15.
- Savadogo P, Sawadogo L, Tiveau L. 2007. Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 (1–4): 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.002>
- SMN (Sistema Meteorológico Nacional). 2022. Normales climatológicas por estado, Oaxaca. Sistema Meteorológico Nacional-CONAGUA. México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=oax>
- Tilley JMA, Terry RA. 1963. A Two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. *Grass and Forage Science* 18 (2): 104–111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>
- Van Soest PJ, Wine RH. 1967. Use of detergent in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell wall constituents. *Journal of Association of Official Analytical Chemists* 50 (1): 50–55. <https://doi.org/10.1093/jaoac/50.1.50>

# IDENTIFICATION OF DISEASE IN TOMATO LEAVES USING MACHINE LEARNING CLASSIFIERS AND DIGITAL IMAGES

Juan Pablo **Ambrosio-Ambrosio**<sup>1</sup>, Juan Manuel **González-Camacho**<sup>1\*</sup>,  
Abraham **Rojano-Aguilar**<sup>2</sup>, David Hebert **del Valle-Paniagua**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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. 56264.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C.P. 56227.

\* Author for correspondence: [jmgc@colpos.mx](mailto:jmgc@colpos.mx)

## ABSTRACT

Early identification of diseases in crops improves agronomic decision-making and has a positive impact on agricultural production. In this study, we evaluated three machine learning classifiers to identify three diseases in a tomato crop (*Solanum lycopersicum*) using chromatic characteristics of digital images of leaves, and a computational tool was developed for its practical use. The classifiers were support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP), and histogram gradient boosting (HGB). The target classes were tomato yellow leaf curl virus (V), the fungus *Septoria lycopersici* (H), the acarid *Tetranychus urticae* (A), and healthy leaves (S). The images were preprocessed to eliminate anomalies and the selection algorithm by region was used to obtain pixels of representative color for each target class. The pixels were then transformed from RGB to the HSV color model to create the training database, which consisted of three-color characteristics (H, S and V) and the associated target class. The three classifiers achieved similar prediction performance. According to the Kruskal Wallis test, there were no significant differences ( $p$ -value = 0.5117). SVM obtained an overall accuracy ( $Acc$ ) of 93.3 %, MLP obtained a value of 93.2 %, and HGB of 93.1 %. Moreover, in performance at the class level (diseases), SVM obtained a higher F1 = 96 % in identification of symptoms caused by *Septoria lycopersici* and a lower F1 = 90 % in identification of symptoms caused by *Tetranychus urticae*. The computational tool developed, IDENTO v1.0, facilitated identification of the three leaf diseases in tomato based on optimized classifiers and constitutes an option for promoting the use of artificial intelligence in agriculture.

**Keywords:** Artificial intelligence, multi-class classification, support vector machine, decision trees, neural networks, optimization.

## INTRODUCTION

The growing world population demands more efficient agricultural production to guarantee food security. Tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the most cultivated plants in the world due to its consumption and economic importance. The increase in its demand has promoted an increase in production and cultivated area. In 2019 the

**Citation:** Ambrosio-Ambrosio JP, González-Camacho JM, Rojano-Aguilar A, del Valle-Paniagua DH. 2023. Identification of disease in tomato leaves using machine learning classifiers and digital images.

Agrociencia 57(3): 476-507.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2462>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 12, 2021.  
Approved: February 28, 2023.

**Published in Agrociencia:**  
May 11, 2023.

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



FAO (2021) reported a world production of 180 766 329 Mg on 5 030 545 ha. Mexico, at the close of the 2020 growing cycle reported a production of 3 249 186 Mg of tomatoes on an area of 44 814 ha (SIAP, 2021).

Tomato yield is affected by pests and diseases, and timely detection is important for taking preventative and corrective actions (Seminis, 2017). Padol and Yadav (2016) developed a disease classification system for grape leaves in which they applied the nearest neighbors algorithm to segment diseased regions in images, extract characteristics of color and texture, and implement a support vector machine with an overall accuracy of 88.9 %. Abdullah *et al.* (2007) applied a multilayer neural network to classify diseases in rubber tree leaves with two approaches: RGB dominant pixels (mean) and normalized data. These authors reported precision of 70 % and sensitivity of more than 80 %.

Saleem *et al.* (2019) presented a review of deep learning models to classify diseases in crops. Particularly, they reported that the models of convolutional neural networks have been applied in disease detection with overall accuracy of more than 95 %. Fuentes *et al.* (2017) proposed a detector of tomato leaf diseases in real time based on deep-learning meta-architectures. These authors were able to successfully recognize nine different categories of diseases and pests with an overall accuracy between 80 and 85 %.

The objective of this study was to evaluate the performance of three machine learning models (support vector machine, multilayer perceptron, and histogram gradient boosting) and develop a computational tool to facilitate identification of tomato leaf diseases, such as tomato yellow leaf curl virus (TYLCV), leaf spot *Septoria lycopersici*, and damage by the acarid *Tetranychus urticae*, and differentiate them from healthy leaves, using digital images. We assume that the paradigms of machine learning represent a viable, low-cost alternative for identification of plant diseases based on color.

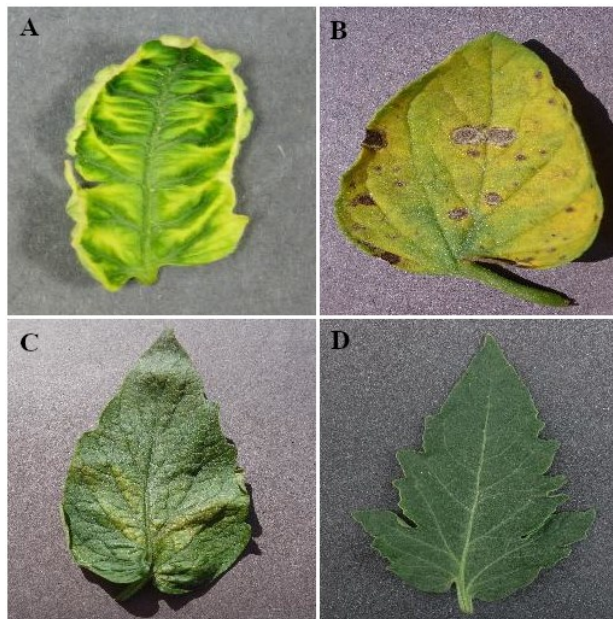
## MATERIALS AND METHODS

### Data set

The database of images used in this study consisted of a sub-set of 80 digital images (20 per target class) reported by Hughes and Salathé (2015). These images of healthy and diseased leaves were captured in the laboratory under different conditions of illumination (<https://www.kaggle.com/datasets/emmarex/plantdisease>). Each image was saved in jpg graphic format with a size of 256 x 256 pixels and a resolution of 96 pixels per inch. Each pixel of the image was transformed to the RGB standard color model with three color channels: red (R), green (G) and blue (B), associated with one of the four target classes: V, H, A and S.

The V class represents leaves infected by TYLCV, whose symptomology is manifested by small, wrinkled leaves that are yellow between veins and have curled edges (Prasad *et al.*, 2020). Class H represents leaves affected by *Septoria lycopersici*, a fungus that

causes small, dark, aqueous lesions that grow and become circular lesions with black or brown edges (Semini, 2017). Class A represents leaves affected by *Tetranychus urticae*, an acarid that causes white dots, chlorosis and, in severe cases, necrosis and defoliation (Pérez-Hedo *et al.*, 2018). Class S is that of healthy leaves (Figure 1).



**Figure 1.** Images of tomato leaves with symptoms of disease. A: tomato yellow leaf curl virus; B. *Septoria lycopersici*; C: *Tetranychus urticae*; D: healthy leaf.

### Computational tools

Images were processed and analyzed with the tools Opencv 4.5.1.48 and Scikit image 0.15.0. The machine learning algorithms were implemented in Python 3.7 language with the Scikit learn 0.21.3 library (Pedregosa *et al.*, 2011) in the Spyder 3.6 development platform. For the vector and matrix operations, we used the tools provided by Pandas 0.25.1 and Numpy 1.16.5. with visualization of the outputs with Matplotlib 3.1.1. The Graphic interface was developed with Pyqt 5.9.2.

Images, data, and training of the learning models were processed with a computer system under Windows 10 environment of 64 bits, Intel Core i5 7th processor Gen @2.50 GHz, 500 SSD, 16 GB installed RAM memory.

### Image processing

RGB images of the leaves were segmented by transformation to the HSV (*Hue, Saturation, Value*) color model to increase the visual difference between the leaf and the background. In HSV, H is the tone, which varies from 0 to 360 °, where each degree represents a color; S refers to colorimetric purity and varies from 0 to 100 % (maximum

color saturation); and V is the value or brightness and takes values from 0 % (black) to 100 % (white) (Camastra and Vinciarelli, 2015). The H, S, and V channels of each pixel of the image were then weighted with the following expression (Cuevas *et al.*, 2010):

$$I_i = 0.2989 * H + 0.5870 * S + 0.1140 * V$$

where  $I_i$  is the weighted value of each pixel of the image.

With the set of  $I_i$  weighted values, the optimum threshold was determined with the OTSU algorithm to segment the leaf from the background of the image in binary form (1: leaf; 0: background) (Dey, 2020). A Gaussian filter with a 5 x 5 kernel and mean = 0 was applied to the segmented image of the leaf to homogenize it. Then, in images with damage on the edges, a morphological closure operation was applied to replace the 0 value pixels that formed part of the leaf with 1 value pixels. To eliminate noise in the image, the erosion operation was applied to 1 value replace pixels that did not form part of the leaf with value = 0. With the resulting binary image, the outer edge of the leaf was detected. With the image of the leaf profile, a mask with the values of white (255, 255, 255) was created to extract the pixels that form part of the original image in RGB format, and with the values of black (0, 0, 0) the leaf background (Cuevas *et al.*, 2010). The images with problems of illumination and/or focus (salt and pepper noise), were smoothed with low pass filters such as the Gaussian, mean or median filters.

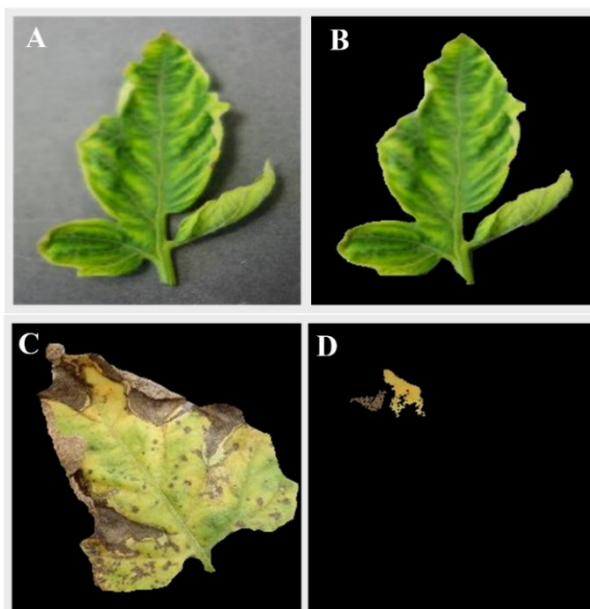
#### Extraction of characteristics

Color characteristics (obtaining samples of representative pixels of each target class) were extracted using the region growing algorithm (RG). This algorithm consists of selecting a seed pixel that represents the target class and determining by similarity the pixels that belong to a region defined by the seed pixel. RG compares each of the neighboring pixels (vicinity of four or eight pixels) with the seed pixel. If it complies to the similarity criterion, it is annexed to the region. To explore a new region of interest, another seed pixel is selected in the image and the search restarts. The algorithm terminates when adjacent pixels similar to the seed are not found, or when the entire image has been covered.

The binary image is used as a mask to recover the values of the three RGB channels of the original image. Dissimilarity ( $d$ ) determines how different the pixels should be to exclude them from the selection. We used 30 images of leaves for each target class (V, H, A and S) with different seeds and values of  $d$  in the interval [0.03, 0.08] (Li *et al.*, 2015). The set of RGB color pixels was cleansed of pixels that were duplicated within and between target classes to create a set of unique R, G, and B input pixels.

#### Samples of selected images

The tomato leaves were segmented from the image background (Figures 2A and 2B) using the HSV color model and an elliptical kernel to smooth the outline of the leaf. In the closure operation, a 5 x 5 kernel was applied with six successive repetitions, and



**Figure 2.** A: original tomato leaf; B: extraction of the object of interest, leaf infected by the tomato yellow leaf curl virus; C: leaf infected by *Septoria lycopersici*; D: Selection of samples, region growing algorithm with two seed pixels.

in the erosion operation, a  $3 \times 3$  kernel was used with three successive repetitions. The images of the leaves with defined homogeneous edges were segmented automatically. However, the wrinkled leaves with shadows and noise were segmented manually to add and/or subtract small regions.

The selection of sample color pixels (R, G, B triplets) was obtained with the region growing algorithm and dissimilarity of 0.05 (Figure 2C) with two seed pixels (Figure 2D). In the input dataset, the value triplets (R, G, B) consisted of 40 000 samples (10 000 per target class), where each sample was associated with its target class (V, H, A, or S).

### Machine learning models

#### Support vector machine

The support vector machine model (SVM) is a machine learning algorithm that is used to solve problems of classification or regression (Raschka and Mirjalili, 2017). SVM training consists of finding a hyperplane that separates the target classes in such a way that the margin between the support vectors is maximum. Smola and Schölkopf (2004) point out that, for the case of a bidimensional problem, the separation hyperplane is a line defined by:

$$f(x) = w^T x + b$$

where  $w$  is the vector of weights;  $x$  is the vector of input characteristics; and  $b$  is the bias. To find the maximum margin, one alternative is minimizing the norm of  $w$ , that is,  $\|w\|^2 = w^T w$ , and solving a problem of convex optimization. Slack variables  $\zeta$  are introduced to smooth the linear restrictions and achieve convergence in linearly optimizing inseparable problems (Vapnik, 1995). With this approach, the loss function is expressed as (Géron, 2019):

$$L = \min_{w,b,\zeta} \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^n \zeta^{(i)}$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} t^{(i)} (w^T x^{(i)} + b) \geq 1 - \zeta^{(i)} \\ \zeta^{(i)} \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

where  $y^{(i)}$  is the  $i^{\text{th}}$  predicted response;  $x^{(i)}$  is a characteristic input vector;  $w$  is a vector of weights or parameters;  $b$  is the bias;  $\zeta^{(i)}$  is a slack variable;  $n$  is the number of samples;  $t^{(i)}$  is equal to -1 for negative samples (if  $y^{(i)} = 0$ ) and 1 for positive samples (if  $y^{(i)} = 1$ ) and  $C$  is the hyperparameter of balance between reducing the slack variables and maximizing the margin with a minimum  $w$  norm (Deisenroth *et al.*, 2020).

### Multilayer perceptron

The multilayer perceptron (MLP), or feed forward artificial neural network, is a generalization of the perceptron model proposed by Rosenblatt (1958). MLP architecture comprises three types of layers: the input layer ( $C_e$ ), the hidden layer ( $C_o$ ), and the output layer ( $C_s$ ). The number of neurons in  $C_e$  is equal to the number of characteristics or input variables; the number of neurons in  $C_o$  is  $d$  (hyperparameter), and in  $C_s$  it is equal to the number of target classes ( $K$ ). The neurons in each layer feed forward and are represented by a matrix of weights ( $W$ ), with no connection between neurons of the same layer (Ramchoun *et al.*, 2016).

The MLP classifier is trained iteratively for each sample of the subset of  $A$  training data. The matrix of weights  $W$  of MLP is initialized with random values between 0 and 1. The subset  $A$  passes through  $C_e$ , the output of the activation function enters at  $C_o$ , then the output enters at  $C_s$ . This process in matrix form is expressed by:

$$A^{(s)} = \varphi(\varphi(A^{(e)} W^{(0)} W^{(s)}))$$

where  $A^{(e)}$  is a matrix of input samples ( $n \times m$ ) where  $n$  is the number of samples, and  $m$  is the number of characteristics or input variables;  $W^{(0)}$  is a matrix of weights ( $m \times d$ ), where  $d$  is the number of neurons of the intermediate layer;  $\varphi(\cdot)$  is an activation function, such as *relu*, *sigmoide*, *softplus*, *tanh* or *softmax* (Atienza, 2020);  $W^{(s)}$  is a matrix

of output weights ( $d \times K$ ) where  $K$  is the number of target classes of network outputs; and  $A^{(s)}$  is a matrix of probabilities ( $n \times K$ ) that represents the outputs of the MLP network (Raschka and Mirjalili, 2017).

The error was measured using a loss function ( $L$ ) that compares the desired and predicted responses (Atienza, 2020). The process of back propagation of the error begins with the calculation of partial derivatives using the chain rule, the contribution to the error is calculated for each connection, and the values are updated with the descending gradient algorithm. This optimizer minimizes the logistic loss function, or crossed entropy,  $L$ , which is expressed by:

$$L = - \sum_{k=1}^K T_k \log(y_k) \quad (1)$$

where  $K$  is the total number of target classes;  $T_k$  is the observed target class; and  $y_k$  is the predicted target class (probability of membership).

### Histogram gradient boosting

The histogram gradient boosting classifier (HGB) is an ensemble method that uses multiple machine learning models. The HGB architecture uses decision trees as the nucleus and integrates a sequential additive model in which a decision tree is trained with the residual errors of its antecessor. In the end, a more robust and powerful HGB model is obtained (Géron, 2019).

The sequential approach makes model training slower when the dataset is large (tens of thousands of samples). Unlike the random forest model that uses independent decision trees, HGB uses groups of input characteristics by means of classes that represent intervals of whole numbers. Moreover, it uses histograms to divide the samples and decrease training time. The size of the decision trees can be controlled using hyperparameters: maximum number of leaves per node (mln), maximum depth (md), and minimum samples per leaf (msl); the loss function to be minimized is the logistic function (Equation 1) (Pedregosa *et al.*, 2011). Friedman (2001) presented a detailed mathematical description of the histogram gradient boosting model and different alternatives of loss functions.

### Classifier performance metrics

The metrics used to evaluate the performance of a classifier are deduced from a confusion matrix (CM) in which the rows represent the observed classes, and the columns represent the classes predicted by the classifier. A sample that is classified correctly as class 1 is denominated true positive (TP) a sample that is classified correctly as class 0 is denominated true negative (TN). A false negative (FN) occurs when a sample of class 1 is classified as class 0. A false positive (FP) occurs when a sample of class 0 is classified as class 1 (Raschka and Mirjalili, 2017). The performance metrics of the classifiers used in this study were the following (Powers, 2011):

The overall accuracy (Acc) is the proportion of correct classifications relative to the total number of samples and is calculated by:

$$\text{Acc} = \frac{\text{TN} + \text{TP}}{\text{TN} + \text{TP} + \text{FN} + \text{FP}}$$

Precision (P) evaluates the proportion of positive predictions, and measures the reliability of the prediction to classify the target class and is defined as:

$$P = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}$$

Sensitivity (S) measures the capacity of the classifier to detect positive samples correctly and is calculated by:

$$S = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}$$

The metric F1 score is the harmonic mean of P and S, and is calculated by:

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

Given that P and S vary inversely, the trade-off between the two metrics depends on the objective of classification. The precision-sensitivity curve (P-S) enables identification of an optimum point to balance the two metrics; the area under the P-S curve ( $AUC_{P-S}$ ) is a metric that considers the imbalance between classes.

The ROC (*receiver operating characteristic*) curve is a graph of S *versus* TFP, where TFP is the rate of false positives, the proportion of negatives classified as positive,  $TFP = 1 - E$ , where E is the specificity, the proportion of negative samples classified as negative. The ROC curve is graphed with values of S *versus*  $1 - E$  for different thresholds of probability of membership to each target class. The area under the ROC curve ( $AUC_{ROC}$ ) measures the performance of a classifier, a value near 1 is considered optimal (Hand and Till, 2001).

### **Classifier training and prediction performance**

The training of classifiers SVM, MLP and HGB was carried out in two stages. The first consisted of selecting the optimal hyperparameters of each classifier. The second was evaluating the predictive capacity of the classifiers based on the optimal hyperparameters.

### Grid search and selection of hyperparameters

Selection of optimum hyperparameters of the classifiers was based on a grid search and a cross-validation procedure (VC). The grid search consists of defining ranges of values for each hyperparameter of interest. For each combination of values, the classifier trains using VC with  $p$  random partitions. VC uses a random partition of the original dataset as a training set for which  $p$  random disjointed partitions stratified per target class are generated. For each combination of hyperparameters, the model trains  $p$  times using a partition for the test and the rest for training. After  $p$  iterations, the average Acc is obtained. At the end of the search, the combination of hyperparameters that maximizes the average Acc is selected. In this study, 80 % of the data were used for training, 20 % for testing, and VC with  $p = 5$ . The range of values of the grid search for each hyperparameter was defined experimentally by trial and error (Table 1) (Raschka, 2018).

**Table 1.** Value ranges of hyperparameter defined in the grid search for the classifiers support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP) and histogram gradient boosting (HGB).

Classifier	Hyperparameter	Values
SVM	<i>C</i>	0.5, 1, 10, 25, 50
	<i>kernel</i>	linear, polynomial, rbf <sup>†</sup> , sigmoid
	<i>Gamma</i>	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9
	<i>fd</i> <sup>‡</sup>	ovo <sup>§</sup> , ovr <sup>b</sup>
MLP	<i>Hidden layer</i>	100, 120, 150
	<i>fa</i> <sup>¶</sup>	relu, logistic
	<i>optimizer</i>	adam, <sup>††</sup> sgd
	<i>ta</i> <sup>‡‡</sup>	constant, adaptative
	<i>alfa</i>	0.0001, 0.001, 0.01
HGB	<i>ta</i> <sup>‡‡</sup>	0.05, 0.1, 0.2
	<i>mhn</i> <sup>§§</sup>	25, 31, 50
	<i>mp</i> <sup>b<sup>b</sup></sup>	9, 10, 11
	<i>mmh</i> <sup>‡‡‡</sup>	15, 20, 25

<sup>†</sup>*rbf*: kernel Gaussian; <sup>‡</sup>*fd*: decision function; <sup>§</sup>*ovo*: one against one; <sup>b</sup>*ovr*: one against the rest; <sup>¶</sup>*fa*: activation function; <sup>††</sup>*sgd*: stochastic gradient descent; <sup>‡‡</sup>*ta*: learning rate; <sup>§§</sup>*mhn*: maximum number of leaves per node; <sup>b<sup>b</sup></sup>*mp*: maximum depth; <sup>‡‡‡</sup>*mmh*: maximum number of samples per leaf.

### Classifier prediction performance

The performance of each classifier was evaluated based on the entire dataset and the optimal hyperparameters. Training and test of each classifier were carried out with VC ( $p = 5$ ) and the Acc metric. In each iteration, the performance metrics are obtained based on the test partitions. At the end of VC, the Acc, F1 macro averages and standard deviations were obtained. The three classifiers with optimal values of Acc were then used to obtain the metrics P, S and F1 for each target class.

### Prediction and identification with new images

In this study, the computational tool denominated IDENTO was developed to identify diseases on tomato leaves in unseen images (not used in the training step) based on optimal learning classifiers. Moreover, IDENTO allows image processing to create new datasets for training and test. The tool is intended to facilitate the use of machine learning models and their practical application in recognizing the analyzed diseases (Ambrosio-Ambrosio and González-Camacho, 2022).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Optimal hyperparameters

To select optimal hyperparameters, a training dataset with 128 000 samples (32 000 per target class) selected by a random sampling of the full dataset was used and stratified for each target class (Table 2).

**Table 2.** Optimal hyperparameters obtained by means of a grid search and cross-validation of the classifiers support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP), and histogram gradient boosting (HGB).

Classifier	Hyperparameter	Optimum
SVM	<i>C</i>	50
	<i>kernel</i>	rbf <sup>†</sup>
	<i>Gamma</i>	10
	<i>fd</i> <sup>‡</sup>	ovr <sup>§</sup>
	<i>Co</i>	150
MLP	<i>fa</i> <sup>b</sup>	Relu
	<i>optimizer</i>	Adam
	<i>ta</i> <sup>‡</sup>	0.001
	<i>alfa</i>	0.0001
	<i>ta</i> <sup>‡</sup>	0.1
HGB	<i>mhn</i> <sup>††</sup>	31
	<i>mp</i> <sup>‡‡</sup>	11
	<i>mmh</i> <sup>§§</sup>	15

<sup>†</sup>rbf: Gaussian kernel; <sup>‡</sup>fd: decision function; <sup>§</sup>ovr: one versus the rest; <sup>b</sup>fa: activation function; <sup>‡</sup>ta: learning rate; <sup>††</sup>mhn: maximum number of leaves per node; <sup>‡‡</sup>mp: maximum depth; <sup>§§</sup>mmh: maximum number of samples per leaf.

### Evaluation of classifier performance

The three classifiers achieved good performance  $F1 > 0.95$  for classifying class H, the fungus *Septoria lycopersici* that causes brown spots with highly distinctive yellow outline. For class A, the acarid *Tetranychus urticae*, a value of  $F1 > 0.89$  was obtained since it was not notably different from class S (Table 3)

**Table 3.** Performance of the classifiers support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP) and histogram gradient boosting (HGB); metrics precision (P), sensitivity (S), score (F1) for each target class.

Model	Class	P	S	F1	AUC <sub>ROC</sub>	AUC <sub>P-S</sub>
SVM	V <sup>†</sup>	0.95	0.92	0.93	0.98	0.95
	H <sup>‡</sup>	0.95	0.96	0.96	0.99	0.97
	A <sup>§</sup>	0.89	0.90	0.90	0.97	0.91
	S <sup>¶</sup>	0.94	0.95	0.94	0.99	0.96
MLP	V	0.95	0.91	0.93	0.99	0.98
	H	0.95	0.96	0.95	1.00	0.99
	A	0.89	0.90	0.90	0.98	0.95
	S	0.94	0.96	0.95	0.99	0.98
HGB	V	0.94	0.91	0.93	0.99	0.98
	H	0.95	0.96	0.95	1.00	0.99
	A	0.88	0.90	0.89	0.98	0.94
	S	0.94	0.95	0.94	0.99	0.98

<sup>†</sup>V: tomato yellow leaf curl virus; <sup>‡</sup>H: fungus *Septoria lycopersici*; <sup>§</sup>A: acarid *Tetranychus urticae*; <sup>¶</sup>S: healthy leaf.

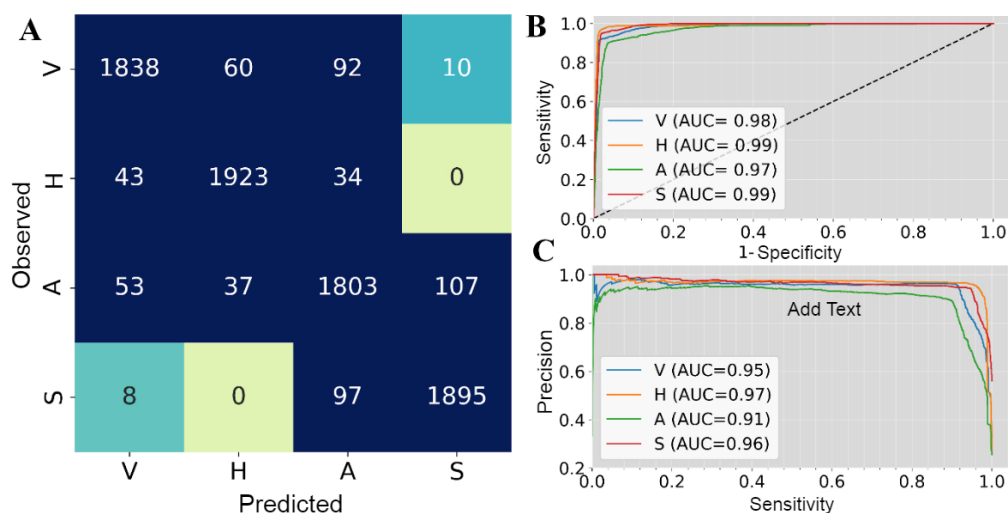
The three models had similar performance (Table 3), the class H, fungus *Septoria lycopersici*, was identified more efficiently and class A, acarid *Tetranychus urticae*, less efficiently. SVM obtained the highest F1 score, 96 %, and HGB had the lowest score, F1 = 89 %. At the class level, the performance metrics were very similar.

The SVM confusion matrix for a test set of 8000 random samples describes a total of 7459 pixels classified correctly with Acc = 93.2 % (Figure 3A). The ROC and P-S curves confirm that SVM had better performance in classifying class H than for class A (Figure 3B and 3C). The RF and HGB classifier confusion matrixes were very similar to SVM.

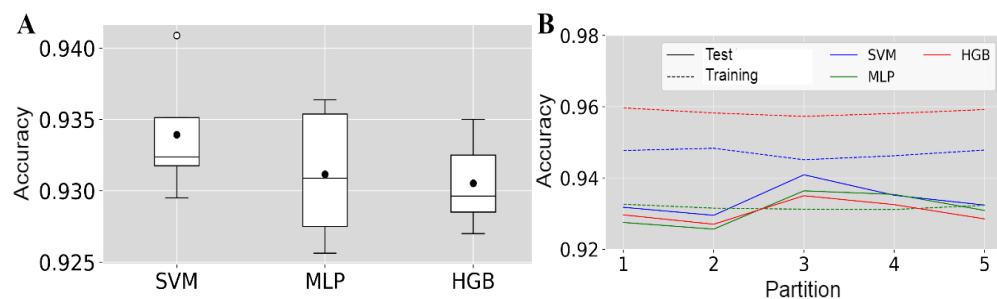
The final evaluation of performance of the classifiers SVM, MLP and HGB was carried out with a VC,  $p = 5$  random partitions of 32 000 samples for training and 8000 for test prediction based on the metric Acc. Comparison of the three classifiers shows that, in terms of the median and the mean, Acc was more than 93 % (Figure 4A).

The classifiers SVM, MLP, and HGB had no problems of data overfitting. This occurs when the classifier achieves very high performance with the training set and low performance with the test, or prediction, set. The HGB classifier obtained very large differences in Acc between training and testing in the five random partitions of VC. However, these differences did not reflect an overfitting problem (Figure 4B).

SVM obtained Acc = 0.947 ( $\pm 0.001$ ) in training and in testing 0.934 ( $\pm 0.004$ ). MLP achieved Acc = 0.932 ( $\pm 0.001$ ) in training and 0.931 ( $\pm 0.005$ ) in testing; HGB reached a training Acc = 0.959 ( $\pm 0.001$ ) and a test Acc of 0.931 ( $\pm 0.003$ ). Based on overall precision, average Acc, the three classifiers obtained very similar prediction performance, *i.e.*, SVM (93.4 %), MLP (93.2 %) and HGB (93.1 %). The non-parametric Kruskal Wallis



**Figure 3.** Support vector machine (SVM) performance. A: confusion matrix; B: ROC curves; C: P-S curves, precision *versus* sensitivity. Target classes: tomato yellow leaf curl virus (V), fungus *Septoria lycopersici* (H), acarid *Tetranychus urticae* (A), and healthy leaf (S).



**Figure 4.** Comparison of overall accuracy (Acc) of the classifiers support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP), and histogram gradient boosting (HGB). A. box plot of Acc; B. Graph of Acc in training and test for each partition k obtained by cross-validation.

test was applied to compare the response in terms of Acc performance of the three classifiers with five replications, and  $\chi^2 = 1.34$ ,  $df = 2$ ,  $p\text{-value} = 0.5117$  was obtained and thus confirms that there were no significant differences in performance.

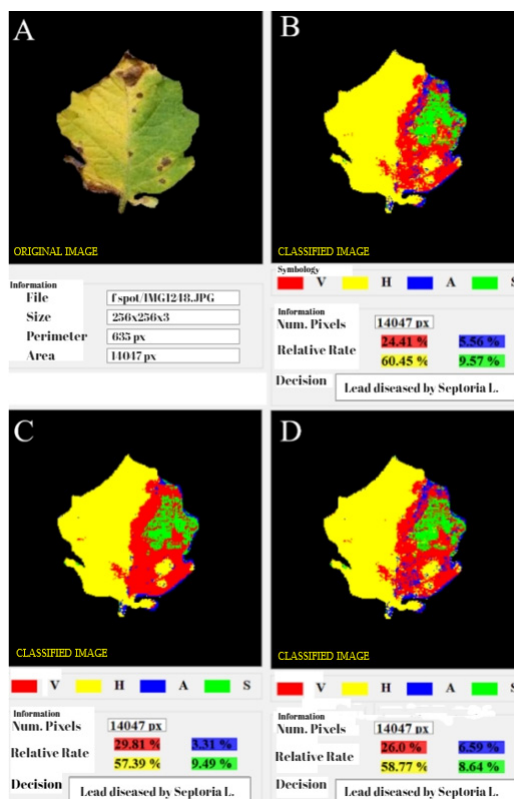
Regarding the performance achieved by the three classifiers, Acc was more than 93 % and was acceptable for identifying the diseases described and under the conditions of acquisition of the leaf images. In terms of computation time, the algorithms SVM and HGB are faster than MLP, and SVM was more stable in training and in testing (Figure 4B). SVM, MLP and HGB represent three different supervised machine learning paradigms. SVM is grounded in a process of quadratic optimization (Smola and Schölkopf, 2004; Vapnik, 1995), MLP is a non-linear approximation model (Ramchoun *et al.*, 2016), and HGB is based on a geometric approach of decision tree assembly

(Friedman, 2001). The relationship precision *versus* computation time of a machine learning algorithm, relative to deep learning paradigms is highly superior. However, to increase the predictive capacity of the learning algorithms even more, the use of deep learning is a viable option with a higher computational cost (Saleem *et al.*, 2019; Padol and Yadav, 2016).

### Disease prediction in new leaf images

The computational tool IDENTO v1.0 allows identification of diseases based on the optimal learning models used in this study. Identification comprises two stages. The first processes an RGB image to segment the leaf from the background (homogeneous). The second uses the segmented leaf to classify and identify the tomato disease. The classifiers SVM, MLP and HGB are activated from the Python platform and predict the disease.

The predictive capability of IDENTO v1.0 was demonstrated with an unseen tomato leaf image, not used in the classifier training or test stages, from the database consulted for this study. The image was 256 x 256 pixels with three color channels, R, G, B (Figure 5A). The three classifiers coincided in indicating *Septoria lycopersici* as the



**Figure 5.** Identification of three diseases on tomato leaves, based on the classifiers support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP), and histogram gradient boosting (HGB). A: preprocessed tomato leaf image; B: identification with SVM; C: identification with MLP; D: identification with HGB.

causal agent of the symptoms. The difference in Acc global precision of the models causes a change in the distribution of the pixels by class. Class H with SVM obtained the largest number of predicted pixels, 60.5 % (Figure 5B), and MLP had the lowest number, 57.4 % (Figure 5C). Given that the difference in the proportions of pixels is small, the visualized outputs are very similar.

The tool incorporates heuristic decision rules obtained by trial and error for identification of the most relevant disease, based on the relative rate of pixels (TR), that is, the proportion of pixels of a class of the total number of pixels of the leaf. If TR is higher than 70 % for class S, the leaf is identified as healthy. If TR is higher than 35 % for class V, it is identified as a leaf diseased by TYLCV, and if TR is more than 17 % for class H, it is identified as a leaf diseased by *Septoria lycopersici*, while if TR is more than 20 % for A, the disease is identified as caused by *Tetranychus urticae*. The thresholds of TR were defined in function of the analysis of multiple TR obtained when prediction was executed on the set of test images; overall precision in classification was more than 93 % (Kulkarni *et al.*, 2021).

## CONCLUSIONS

The three classifiers, support vector machine (SVM), multilayer perceptron (MLP), and histogram gradient boosting (HGB) reached an overall accuracy (Acc) of more than 93 % in predicting the target classes: tomato yellow leaf curl virus (V), the fungus *Septoria lycopersici* (H), the acarid *Tetranychus urticae* (A), and healthy leaves (S). The fungus *Septoria lycopersici* was classified with a value of F1 = 96 %, healthy leaves with F1 = 95 %, tomato yellow leaf curl virus with F1 = 93 %, and the acarid *Tetranychus urticae* with F1 = 90 %.

The computational tool IDENTO v1.0 we developed enables practical application of the machine learning classifiers evaluated for identification of the diseases in tomato leaves based on the proposed heuristic rules. The user guide of the software is available at <https://github.com/JPAAPSEICOA/Manual-IA-IMAGE-PROV1.0>. This study shows the importance of applying machine learning paradigms using digital images for disease identification.

## REFERENCES

- Abdullah NE, Rahim AA, Hashim H, Kamal MM. 2007. Classification of rubber tree leaf diseases using multilayer perceptron neural network. *In* 2007 5th Student Conference on Research and Development. IEEE Xplore: Selangor, Malaysia, pp: 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2007.4451369>
- Ambrosio-Ambrosio JP, González-Camacho JM. (2022). IDENTO v1.0: una herramienta computacional para identificación automática de enfermedades en hojas de tomate. Colegio de Postgraduados. INDAUTOR, registro: 03-2022-061711283400-01.
- Atienza R. 2020. Advanced deep learning with TensorFlow 2 and Keras (Second edition). Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK. 491 p.
- Camstra F, Vinciarelli A. 2015. Machine learning for audio, image and video analysis (Second edition). Springer: London, UK. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6735-8>
- Cuevas E, Zaldívar D, Pérez-Cisneros M. 2010. Procesamiento digital de imágenes usando Matlab & Simulink. Alfaomega: Ciudad de México, México. 815 p.

- Deisenroth MP, Faisal AA, Ong CS. 2020. Mathematics for machine learning. Cambridge University Press: Cambridge, UK. 407 p. <https://mml-book.com> (Recuperado: abril 2021).
- Dey S. 2020. Python image processing cookbook. Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK. 438 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2021. Production/yield quantities of tomatoes in world + (total) 1994–2019. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize> (Recuperado: mayo 2018).
- Friedman JH. 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics* 29 (5): 1189–1232.
- Fuentes A, Yoon S, Kim SC, Park DS. 2017. A robust deep learning-based detector for real time tomato plant diseases and pests recognition. *Sensors* 17 (9): 1–21. <https://doi.org/10.3390/s17092022>
- Géron A. 2019. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow (Second edition). O'Reilly Media, Inc.: Sebastopol, CA, USA. 819 p.
- Hand DJ, Till RJ. 2001. A simple generalisation of the area under the ROC curve for multiple class classification problems. *Machine Learning* 45: 171–186. <https://doi.org/10.1023/A:1010920819831>
- Hughes DP, Salathé M. 2015. An open access repository of images on plant health to enable the development of mobile disease diagnostics. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.08060>
- Kulkarni V, Gawali M, Kharat A. 2021. Key technology considerations in developing and deploying machine learning models in clinical radiology practice. *JMIR Medical Informatics* 9 (9): e28776. <https://doi.org/10.2196/28776>
- Li W, Du Y, Li H, Wang X, Zhu J. 2015. Decision tree algorithm based on regional growth for the automatic oil field road. *Proceedings of Science* 6: 1–7.
- Padol PB, Yadav AA. 2016. SVM classifier based grape leaf disease detection. *In* 2016 Conference on Advances in Signal Processing. IEEE Xplore: Pune, India, pp: 175–179. <https://doi.org/10.1109/CASP.2016.7746160>
- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V *et al.* 2011. Scikit-learn: machine learning in python. *Journal of Machine Learning Research* 12: 2825–2830.
- Pérez-Hedo M, Arias-Sanguino AM, Urbaneja A. 2018. Induced tomato plant resistance against *Tetranychus urticae* triggered by the phytophagy of *Nesidiocoris tenuis*. *Frontiers in Plant Science* 9: 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01419>
- Powers DM. 2011. Evaluation: from precision, recall and f-measure to roc, informedness, markedness & correlation. *Journal of Machine Learning Technologies* 2 (1): 37–63.
- Prasad A, Sharma N, Hari-Gowthem G, Muthamilarasan M, Prasad M. 2020. Tomato yellow leaf curl virus: impact, challenges, and management. *Trends in Plant Science* 25 (9): 897–911. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.03.015>
- Ramchoun H, Janati MA, Ghanou Y, Ettaouil M. 2016. Multilayer perceptron: architecture optimization and training. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence* 4 (1): 1–5. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2016.415>
- Raschka S, Mirjalili V. 2017. Python Machine Learning (Second edition). Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK. 850 p.
- Raschka S. 2018. Model evaluation, model selection, and algorithm selection in machine learning. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.12808>
- Rosenblatt F. 1958. The Perceptron: a theory of statistical separability in cognitive systems (Project Para). Cornell Aeronautical Laboratory: Washington, DC, USA. 268 p.
- Saleem MH, Potgieter J, Arif KM. 2019. Plant disease detection and classification by deep learning. *Plants* 8 (11): 468. <https://doi.org/10.3390/plants8110468>
- Seminis. 2017. Tomato disease field guide. Seminis Vegetable Seeds. Inc. De Ruitter: St. Louis, MO, USA, 168 p. [https://issuu.com/sureshlm9/docs/tomato\\_disease\\_guide](https://issuu.com/sureshlm9/docs/tomato_disease_guide) (Recuperado: mayo 2021).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2021. Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México, México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Recuperado: mayo 2021).

- Smola AJ, Schölkopf B. 2004. A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing* 14: 199–222. <https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88>
- Vapnik VN. 1995. *The nature of statistical learning theory*. Springer: New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2440-0>

# IDENTIFICACIÓN DE ENFERMEDADES EN HOJAS DE TOMATE POR MEDIO DE CLASIFICADORES DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO E IMÁGENES DIGITALES

Juan Pablo **Ambrosio-Ambrosio**<sup>1</sup>, Juan Manuel **González-Camacho**<sup>1\*</sup>,  
Abraham **Rojano-Aguilar**<sup>2</sup>, David Hebert **del Valle-Paniagua**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática-Cómputo Aplicado. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56227.

\* Autor para correspondencia: [jmgc@colpos.mx](mailto:jmgc@colpos.mx)

## RESUMEN

La identificación automática de enfermedades en cultivos agrícolas mejora la toma de decisiones agronómicas y tiene un impacto positivo en la producción agrícola. En este trabajo se evaluaron tres clasificadores de aprendizaje automático para identificar tres enfermedades en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) a partir de características cromáticas de imágenes digitales de hojas y se desarrolló una herramienta computacional para su uso práctico. Los clasificadores fueron: máquina de soporte vectorial (SVM), perceptrón multicapa (MLP) y potenciación del gradiente (HGB). Las clases objetivo fueron: virus del rizado amarillo de la hoja del tomate (V), hongo *Septoria lycopersici* (H), ácaro *Tetranychus urticae* (A) y hojas sanas (S). Las imágenes se preprocesaron para eliminar anomalías y el algoritmo de selección por región se utilizó para obtener píxeles de color representativos de cada clase objetivo. Los píxeles se transformaron de RGB al modelo de color HSV para crear la base de datos de entrenamiento, la cual que consistió en tres características de color (H, S y V) y la clase objetivo asociada. Los tres clasificadores alcanzaron un desempeño de predicción similar. De acuerdo con la prueba de Kruskal Wallis, no presentaron diferencias significativas ( $p\text{-value} = 0.5117$ ). SVM obtuvo una precisión global de clasificación correcta (Acc) de 93.3 %, MLP obtuvo un valor de 93.1 % y HGB de 93.1 %. Además, en el desempeño a nivel de clase (enfermedades), SVM obtuvo mayor puntaje F1 = 96 % para identificar síntomas causados por *Septoria lycopersici*, y menor puntaje F1 = 90 % para síntomas por *Tetranychus urticae*. La herramienta computacional desarrollada, IDENTO v1.0, facilita la identificación de las tres enfermedades en hojas de tomate con base en los clasificadores optimizados y constituye una alternativa para promover la utilización de la inteligencia artificial en la agricultura.

**Palabras clave:** Inteligencia artificial, clasificación multiclase, máquina de soporte vectorial, árboles de decisión, redes neuronales, optimización.

**Citation:** Ambrosio-Ambrosio JP, González-Camacho JM, Rojano-Aguilar A, del Valle-Paniagua DH. 2023. Identificación de enfermedades en hojas de tomate por medio de clasificadores de aprendizaje automático e imágenes digitales. *Agrociencia* 57(3): 476-507. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2462>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: November 12, 2021.  
Approved: February 28, 2023.  
**Published in Agrociencia:**  
May 11, 2023.

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



## INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial demanda una producción agrícola más eficiente para garantizar la seguridad alimentaria. El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una de las plantas más cultivadas en el mundo debido a su consumo e importancia económica. El incremento en su demanda ha causado un aumento en la producción y del área cultivada. FAO (2021) reportó una producción mundial en 2019 de 180 766 329 Mg en 5 030 545 ha. En México, en el cierre agrícola 2020, se reportó una producción de 3 249 186 Mg de tomate en una superficie de 44 814 ha (SIAP, 2021).

El rendimiento del cultivo de tomate es afectado por plagas y enfermedades; por ello, su detección oportuna es de interés para realizar acciones preventivas y correctivas (Seminis, 2017). Padol y Yadav (2016) desarrollaron un sistema de clasificación de enfermedades en hojas de vid, en el cual aplicaron el algoritmo de vecinos más cercanos para segmentar regiones enfermas en imágenes, extraer características de color y textura, e implementar una máquina de soporte vectorial con una precisión global de clasificación correcta de 88.9 %. Abdullah *et al.* (2007) aplicaron una red neuronal multicapa para clasificar enfermedades en hojas del árbol del caucho con dos enfoques, pixeles dominantes RGB (media) y datos normalizados. Estos autores reportaron una precisión de 70 % y una sensibilidad superior a 80 %.

Saleem *et al.* (2019) presentaron una revisión de modelos de aprendizaje profundo para clasificar enfermedades en cultivos; en particular, reportaron que los modelos de redes neuronales convolucionales se han aplicado a la detección de enfermedades con precisiones de clasificación correcta superiores a 95 %. Fuentes *et al.* (2017) propusieron un detector de enfermedades en hojas de tomate en tiempo real basado en meta-arquitecturas de aprendizaje profundo; estos autores lograron reconocer con éxito nueve categorías diferentes de enfermedades y plagas con una precisión global de clasificación correcta entre 80 y 85 %.

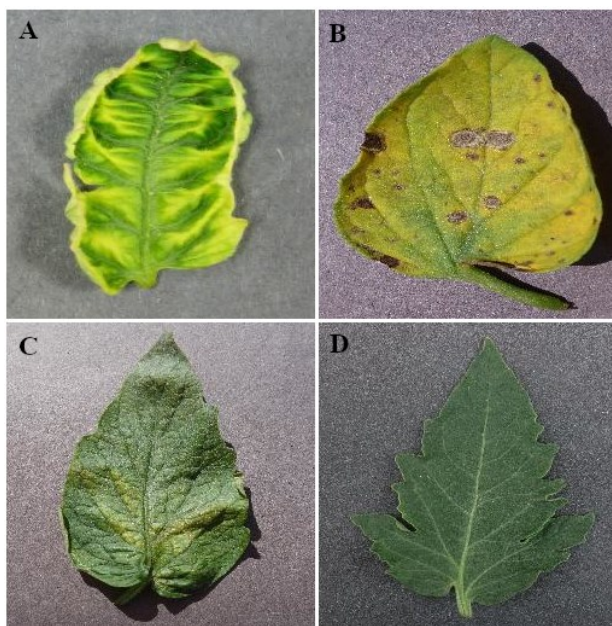
El objetivo de la presente investigación fue evaluar el desempeño de tres modelos de aprendizaje automático máquina de soporte vectorial, perceptrón multicapa y potenciación del gradiente; y desarrollar una herramienta computacional para facilitar la identificación de enfermedades foliares en tomate, tales como el virus del rizado amarillo de la hoja del tomate (TYLCV), mancha de la hoja por *Septoria lycopersici* y daños causados por *Tetranychus urticae*, diferenciándolos de hojas sanas a partir de imágenes digitales. Se asume que los paradigmas de aprendizaje automático representan una alternativa viable y de bajo costo para la identificación de enfermedades en plantas con base en color.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Conjunto de datos

La base de datos de imágenes utilizadas en este estudio consistió en un subconjunto de 80 imágenes digitales (20 por clase objetivo) de plantas de tomate reportadas por Hughes y Salathé (2015). Estas imágenes de hojas sanas y enfermas fueron capturadas en laboratorio bajo diferentes condiciones de iluminación (<https://www.kaggle.com/>

datasets/emmarex/plantdisease). Cada imagen se guardó en formato gráfico jpg en tamaño de 256 x 256 píxeles y resolución de 96 píxeles por pulgada. Cada píxel de la imagen se transformó al modelo de color RGB estándar con tres canales de color, rojo (R), verde (G) y azul (B), asociadas a una de las cuatro clases objetivo V, H, A y S. La clase V representa hojas infectadas por TYLCV, cuya sintomatología se manifiesta por hojas pequeñas de color amarillo entre las venas, con arrugas y márgenes curvas (Prasad *et al.*, 2020); la clase H representa hojas afectadas por *Septoria lycopersici*, hongo que provoca lesiones pequeñas, oscuras y acuosas, que crecen y se vuelven lesiones circulares con bordes negros o cafés (Semini, 2017); la clase A representa hojas afectadas por *Tetranychus urticae*, ácaro que causa puntos blancos, clorosis y, en casos severos, necrosis y defoliación (Pérez-Hedo *et al.*, 2018); y la clase S, que representa hojas sanas (Figura 1).



**Figura 1.** Imágenes de hojas de tomate con síntomas de enfermedad. A: virus del rizado amarillo de la hoja del tomate; B: *Septoria lycopersici*; C: *Tetranychus urticae*; D: hoja sana.

### Herramientas computacionales

El procesamiento y análisis de imágenes se realizó con las herramientas Opencv 4.5.1.48 y Scikit image 0.15.0. La implementación de los algoritmos de aprendizaje automático se realizó en lenguaje Python 3.7 con la librería de Scikit learn 0.21.3 (Pedregosa *et al.*, 2011) en la plataforma de desarrollo Spyder 3.6. Para las operaciones vectoriales y matriciales se hizo uso de las herramientas proporcionadas por Pandas 0.25.1 y Numpy 1.16.5. con la visualización de las salidas mediante Matplotlib 3.1.1. El desarrollo de la interfaz gráfica se llevó a cabo con PyQt 5.9.2.

El procesamiento de imágenes, datos y entrenamiento de los modelos de aprendizaje se realizaron con un sistema de cómputo bajo ambiente Windows 10 de 64 bits, procesador Intel Core i5 7th Gen @2.50 GHz, 500 SSD, memoria RAM instalada de 16 GB.

### Procesamiento de imágenes

La segmentación de las imágenes de hojas se realizó con las imágenes transformadas de RGB al modelo de color HSV (*Hue, Saturation, Value*) para aumentar la diferencia visual entre la hoja y el fondo. En HSV, H es el matiz que varía de 0 a 360 °, donde cada grado representa un color; S se refiere a la pureza colorimétrica y varía de 0 a 100 % (máxima saturación del color); y V es el valor o brillo y toma valores de 0 (negro) a 100 % (blanco) (Camastra y Vinciarelli, 2015). Luego, los canales H, S, y V de cada pixel de la imagen se ponderaron con la siguiente expresión (Cuevas *et al.*, 2010):

$$I_t = 0.2989 * H + 0.5870 * S + 0.1140 * V$$

donde  $I_t$  es el valor ponderado de cada pixel de la imagen.

Con el conjunto de valores ponderados  $I_t$  se determinó un umbral óptimo con el algoritmo OTSU para segmentar la hoja del fondo de la imagen en forma binaria (1: hoja; 0: fondo) (Dey, 2020). A la imagen de la hoja segmentada se le aplicó un filtro Gaussiano con un kernel 5 x 5 y media = 0 para homogeneizarla. Luego, en imágenes con daños en bordes, se aplicó la operación morfológica de cierre para reemplazar los pixeles con valor 0 que forman parte de la hoja con un valor 1. Para eliminar ruido en la imagen, se aplicó la operación de erosión para reemplazar pixeles con valor 1 que no forman parte de la hoja, por un valor = 0. Con la imagen binaria resultante, se detectó el borde externo de la hoja; con la imagen del contorno de la hoja se creó una máscara con los valores del color blanco (255, 255, 255) para extraer de la imagen original, en formato RGB, los pixeles que forman parte de la hoja, y con los valores del color negro (0, 0, 0) el fondo de la hoja (Cuevas *et al.*, 2010). Las imágenes con problemas de iluminación y/o desenfoque (ruido sal y pimienta) se suavizaron con filtros de paso bajo tales como filtro Gaussiano, de media, o mediana.

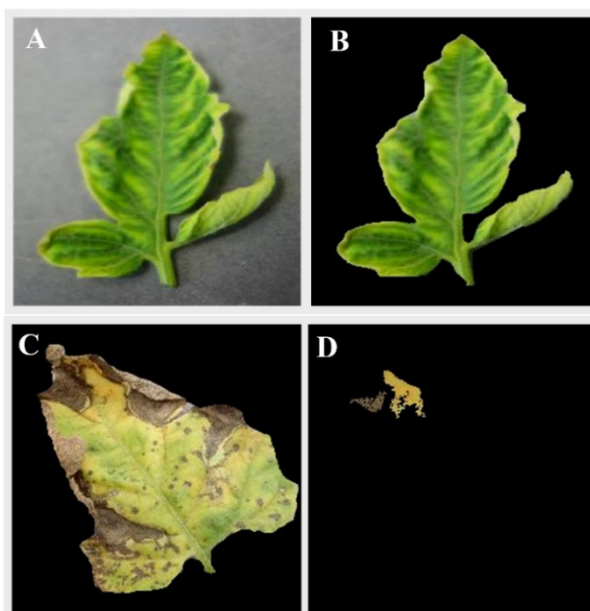
### Extracción de características

La extracción de características de color (la obtención de muestras de pixeles de color representativos de cada clase objetivo) se obtuvieron por medio del algoritmo crecimiento por región (CR). Este algoritmo consiste en seleccionar un pixel semilla que representa la clase objetivo y por similitud determina los pixeles que pertenecen a la región definida por el pixel semilla. CR compara cada uno de los pixeles vecinos (vecindad de cuatro u ocho pixeles) con el pixel semilla, si cumple con el criterio de similitud se anexa a la región; para explorar una nueva región de interés, se selecciona otro pixel semilla en la imagen y se reinicia la búsqueda. El algoritmo termina cuando no se encuentran pixeles adyacentes similares a la semilla o se ha recorrido la imagen completa.

La imagen binaria se utiliza como una máscara para recuperar los valores de los tres canales RGB de la imagen original. La disimilitud ( $d$ ) determina qué tan diferentes deben ser los píxeles para excluirlos de la selección. Se utilizaron 30 imágenes de hojas por clase objetivo (V, H, A y S) con diferentes semillas y valores de  $d$  en el intervalo [0.03, 0.08] (Li *et al.*, 2015). El conjunto de píxeles de color RGB se depuró de píxeles duplicados dentro y entre clases objetivo para crear un conjunto de características o píxeles de entrada R, G, B únicos.

### Muestras de imágenes seleccionadas

Las hojas de tomate se segmentaron del fondo de la imagen (Figura 2A y 2B) por medio del espacio de color HSV y un kernel elíptico para suavizar el contorno de las hojas. En la operación de cierre se aplicó un kernel de  $5 \times 5$  con seis repeticiones sucesivas y en la operación de erosión se utilizó un kernel  $3 \times 3$  con tres repeticiones sucesivas. Las imágenes de hojas con bordes definidos y homogéneos se segmentaron de manera automática; sin embargo, las hojas arrugadas, con sombras y ruido se segmentaron en forma manual para adición y/o sustracción de pequeñas regiones.



**Figura 2.** A: hoja de tomate original; B: Extracción del objeto de interés, hoja infectada por virus del rizado amarillo de la hoja del tomate; C: hoja infectada *Septoria lycopersici*; D: selección de muestras, algoritmo de crecimiento por región con dos píxeles semilla.

La selección de muestras de píxeles de color (tripletas R, G, B) se obtuvo con el algoritmo de crecimiento por región y disimilitud de 0.05 (Figura 2C) con dos píxeles semilla (Figura 2D). En el conjunto de datos de entrada, las tripletas de valores (R, G, B) consistieron en 40 000 muestras (10 000 por cada clase objetivo), donde a cada muestra se le asoció su clase objetivo (V, H, A o S).

## Modelos de aprendizaje automático

### Máquina de soporte vectorial

El modelo máquina de soporte vectorial (SVM, *support vector machine*) es un algoritmo de aprendizaje automático que se utiliza para resolver problemas de clasificación o regresión (Raschka y Mirjalili, 2017). El entrenamiento de SVM consiste en encontrar un hiperplano que separe las clases objetivo, tal que el margen entre los vectores soporte sea máximo. Smola y Schölkopf (2004) señalan que para el caso de un problema bidimensional, el hiperplano de separación es una línea definida por:

$$f(x) = w^T x + b$$

donde  $w$  es el vector de pesos;  $x$  es el vector de características de entrada; y  $b$  es el sesgo. Para hallar el margen máximo, una alternativa consiste en minimizar la norma de  $w$ , esto es,  $\|w\|^2 = w^T w$ ; y resolver un problema de optimización convexa. Las variables de holgura  $\zeta$  se introducen para suavizar las restricciones lineales y alcanzar la convergencia en la optimización de problemas linealmente no separables (Vapnik, 1995). Con este enfoque, la función de pérdida se expresa como (Géron, 2019):

$$L = \min_{w,b,\zeta} \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^n \zeta^{(i)}$$

$$\text{Sujeto a } \begin{cases} t^{(i)} (w^T x^{(i)} + b) \geq 1 - \zeta^{(i)} \\ \zeta^{(i)} \geq 0 \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

donde  $y^{(i)}$  es la respuesta  $i$ -ésima predicha;  $x^{(i)}$  es un vector de características de entrada;  $w$  es un vector de pesos o parámetros;  $b$  es el sesgo;  $\zeta^{(i)}$  es una variable de holgura;  $n$  es el número de muestras,  $t^{(i)}$  es igual a -1 para muestras negativas (si  $y^{(i)} = 0$ ) y 1 para positivas (si  $y^{(i)} = 1$ ) y  $C$  es el hiperparámetro de equilibrio entre reducir las variables de holgura y maximizar el margen con una norma  $w$  mínima (Deisenroth *et al.*, 2020).

### Perceptrón multicapa

El modelo perceptrón multicapa (MLP, *multilayer perceptron*) o red neuronal artificial conectada hacia adelante (*feed forward artificial neural network*) es una generalización del modelo perceptrón propuesto por Rosenblatt (1958). La arquitectura MLP se compone de tres tipos de capas, capa de entrada ( $C_e$ ), capa oculta ( $C_o$ ) y capa de salida ( $C_s$ ). El número de neuronas en  $C_e$  es igual al número de características o variables de entrada, el número de neuronas en  $C_o$  es  $d$  (hiperparámetro) y en  $C_s$  es igual al número de clases objetivo ( $K$ ). Las neuronas de cada capa se conectan hacia adelante, representadas por una matriz de pesos ( $W$ ), sin conexión entre neuronas de una misma capa (Ramchoun *et al.*, 2016).

El entrenamiento del clasificador MLP se realiza en forma iterativa para cada muestra del subconjunto de datos de entrenamiento  $A$ . La matriz de pesos  $W$  de MLP se inicializa con valores aleatorios entre 0 y 1. El subconjunto  $A$  pasa por  $C_e$ , la salida de la función de activación entra a  $C_o$ ; luego, la salida entra a  $C_s$ . Este proceso en forma matricial se expresa por:

$$A^{(s)} = \varphi(\varphi(A^{(e)} W^{(0)}) W^{(s)})$$

donde  $A^{(e)}$  es una matriz de muestras de entrada ( $n \times m$ ) donde  $n$  es el número de muestras y  $m$  es el número de características o variables de entrada;  $W^{(0)}$  es una matriz de pesos ( $m \times d$ ) donde  $d$  es el número de neuronas de la capa intermedia;  $\varphi(\cdot)$  es una función de activación, tales como: *relu*, *sigmoide*, *softplus*, *tanh* o *softmax* (Atienza, 2020);  $W^{(s)}$  es una matriz de pesos de salida ( $d \times K$ ) donde  $K$  es el número de clases objetivo o salidas de la red; y  $A^{(s)}$  es una matriz de probabilidades ( $n \times K$ ) que representa las salidas de la red MLP (Raschka y Mirjalili, 2017).

El error se mide por medio de una función de pérdida ( $L$ ) que compara las respuestas deseadas y predichas (Atienza, 2020). El proceso de propagación del error hacia atrás inicia con el cálculo de derivadas parciales mediante la regla de la cadena, la contribución al error se calcula para cada conexión y los valores de  $W$  se actualizan con el algoritmo de optimización gradiente descendente. Este optimizador minimiza la función de pérdida logística o entropía cruzada,  $L$  que se expresa por:

$$L = - \sum_{k=1}^K T_k \log(y_k) \quad (1)$$

donde  $K$  es el número total de clases objetivo;  $T_k$  es la clase objetivo observada; y  $y_k$  es la clase objetivo predicha (probabilidad de pertenencia).

### Potenciación del gradiente

El clasificador potenciación del gradiente (HGB, *histogram gradient boosting*) es un método de ensamble que emplea múltiples modelos de aprendizaje automático. La arquitectura HGB emplea árboles de decisión como núcleo, e integra un modelo aditivo secuencial, en el cual un árbol de decisión se entrena con los errores residuales de su antecesor. Al final, se obtiene un modelo HGB más robusto y potente (Géron, 2019). Este enfoque secuencial origina que el entrenamiento del modelo sea lento cuando el conjunto de datos es grande (decenas de miles de muestras). A diferencia del modelo bosque aleatorio que emplea árboles de decisión independientes, HGB utiliza agrupaciones de las características de entrada por medio de clases que representan intervalos de valores enteros. Además, hace uso de histogramas para dividir las muestras y disminuir el tiempo de entrenamiento. El tamaño de los árboles de decisión se puede controlar a través de hiperparámetros: máximo número de hojas por nodo (mhn), máxima

profundidad (mp) y mínimo de muestras por hoja (mmh); la función de pérdida a minimizar es la función logística (Ecuación 1) (Pedregosa *et al.*, 2011). Friedman (2001) presentó una descripción matemática detallada del modelo potenciación del gradiente y diferentes alternativas de funciones de pérdidas.

### Métricas de desempeño de los clasificadores

Las métricas para evaluar el desempeño de un clasificador se deducen de una matriz de confusión (MC), donde las hileras representan las clases observadas y las columnas representan las clases predichas por el clasificador. Una muestra que se clasifica correctamente como clase 1 se denomina verdadero positivo (TP); una muestra que se clasifica correctamente como clase 0 se denomina verdadero negativo (TN). Un falso negativo (FN) ocurre cuando una muestra de clase 1 se clasifica como clase 0. Un falso positivo (FP) ocurre cuando una muestra de clase 0 se clasifica como clase 1 (Raschka y Mirjalili, 2017). Las métricas de desempeño de los clasificadores que se utilizaron en este estudio fueron (Powers, 2011):

La métrica precisión global de clasificación correcta (**Acc, accuracy**) representa la proporción de clasificaciones correctas respecto del total de muestras, se calcula por:

$$\text{Acc} = \frac{\text{TN} + \text{TP}}{\text{TN} + \text{TP} + \text{FN} + \text{FP}}$$

La precisión (P) evalúa la proporción de predicciones positivas, y mide la confiabilidad de la predicción para clasificar la clase objetivo. Se define como:

$$P = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}$$

La sensibilidad (S) mide la capacidad del clasificador para detectar muestras positivas correctamente y se calcula por:

$$S = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}$$

La métrica puntaje F1 es la media armónica de P y S, y se calcula por:

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

Dado que P y S varían en forma inversa, el compromiso entre ambas métricas depende del objetivo de la clasificación. La curva precisión-sensibilidad (P-S) permite identificar un punto óptimo para equilibrar ambas métricas; el área bajo la curva P-S ( $AUC_{P-S}$ ) es una métrica que considera el desbalance entre clases.

La curva ROC (*receiver operating characteristic*) es una gráfica de  $S$  versus TFP, donde TFP es la tasa de falsos positivos, la proporción de ejemplos negativos clasificados como positivos,  $TFP = 1 - E$ , donde  $E$  es la especificidad, la proporción de muestras negativas clasificadas como negativas. La curva ROC se grafica con valores de  $S$  versus  $1 - E$  para diferentes umbrales de probabilidad de pertenencia a cada clase objetivo. El área bajo la curva ROC ( $AUC_{ROC}$ , *area under the curve*) mide el desempeño de un clasificador, un valor cercano a 1 se considera óptimo (Hand y Till, 2001).

### **Entrenamiento y desempeño en predicción de los clasificadores**

El entrenamiento de los clasificadores SVM, MLP y HGB se realizó en dos etapas, la primera consistió en seleccionar los hiperparámetros óptimos de cada clasificador, y la segunda, en evaluar la capacidad predictiva de los clasificadores con base en los hiperparámetros óptimos.

### **Búsqueda por retícula y selección de hiperparámetros**

La selección de los hiperparámetros óptimos de los clasificadores se realizó con base en una búsqueda por retícula y un procedimiento de validación cruzada (VC). La búsqueda por retícula consistió en definir intervalos de valores para cada hiperparámetro de interés. Para cada combinación de valores, el clasificador se entrena mediante VC con  $p$  particiones aleatorias. VC utiliza una partición aleatoria del conjunto de datos original como conjunto de entrenamiento, para el cual se generan  $p$  particiones aleatorias disjuntas estratificadas por clase objetivo. Para cada combinación de hiperparámetros, el modelo se entrena  $p$  veces, utilizando una partición para la prueba y el resto para entrenamiento. Después de  $p$  iteraciones, se obtiene el promedio de Acc. Al final de la búsqueda, se selecciona la combinación de hiperparámetros que maximice Acc promedio. En esta investigación se utilizó el 80 % de los datos para entrenamiento, 20 % para prueba y VC con  $p = 5$ . El intervalo de valores de la búsqueda por retícula para cada hiperparámetro se definió de manera experimental por prueba y error (Cuadro 1) (Raschka, 2018).

### **Desempeño en predicción de los clasificadores**

La evaluación del desempeño de cada clasificador se realizó con base en el total del conjunto de datos y los hiperparámetros óptimos. El entrenamiento y prueba de cada clasificador se efectuó con VC ( $p = 5$ ) y la métrica Acc. En cada iteración se obtienen las métricas de desempeño con base en las particiones de prueba. Al término de VC, se obtuvieron los promedios y desviaciones estándar de Acc, F1 macro. Luego, los tres clasificadores con valores óptimos de Acc, se utilizaron para obtener las métricas P, S y F1 para cada clase objetivo.

### **Predicción e identificación con nuevas imágenes**

En esta investigación se desarrolló la herramienta computacional denominada IDENTO para identificar las enfermedades en hojas de tomate en nuevas imágenes

**Cuadro 1.** Intervalos de valores de los hiperparámetros definidos en la búsqueda por retícula para los clasificadores máquina de soporte vectorial (SVM), perceptrón multicapa (MLP) y potenciación del gradiente (HGB).

Clasificador	Hiperparámetro	Valores
SVM	C	0.5, 1, 10, 25, 50
	kernel	lineal, polinomial, rbf <sup>†</sup> , sigmoide
	Gamma	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9
	fd <sup>‡</sup>	ovo <sup>§</sup> , ovr <sup>b</sup>
MLP	Hidden layer	100, 120, 150
	fa <sup>¶</sup>	relu, logistica
	optimizer	adam, <sup>††</sup> sgd
	ta <sup>¶¶</sup>	constante, adaptativo
HGB	alfa	0.0001, 0.001, 0.01
	ta <sup>¶¶</sup>	0.05, 0.1, 0.2
	mhn <sup>§§</sup>	25, 31, 50
	mp <sup>b<sup>b</sup></sup>	9, 10, 11
	mmh <sup>¶¶¶</sup>	15, 20, 25

<sup>†</sup>rbf: kernel Gaussiano; <sup>‡</sup>fd: función de decisión; <sup>§</sup>ovo: uno contra uno; <sup>b</sup>ovr: uno contra el resto; <sup>¶</sup>fa: función de activación; <sup>††</sup>sgd: gradiente descendente estocástico; <sup>¶¶</sup>ta: tasa de aprendizaje; <sup>§§</sup>mhn: máximo número de hojas por nodo; <sup>b<sup>b</sup></sup>mp: máxima profundidad; <sup>¶¶¶</sup>mmh: máximo número de muestras por hoja.

(no utilizadas en el entrenamiento de los clasificadores) con base en clasificadores de aprendizaje óptimos; además, IDENTO permite realizar el procesamiento de imágenes para crear nuevos conjuntos de datos de entrenamiento y prueba. La herramienta pretende facilitar la utilización de los modelos de aprendizaje automático y su aplicación práctica en el reconocimiento de las enfermedades analizadas (Ambrosio-Ambrosio y González-Camacho, 2022).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Hiperparámetros óptimos

Para la selección de hiperparámetros óptimos se utilizó un conjunto de entrenamiento de 128 000 muestras (32 000 por clase objetivo) por medio de un muestreo aleatorio estratificado por clase objetivo del conjunto total (Cuadro 2).

### Evaluación del desempeño de los clasificadores

Los tres clasificadores obtuvieron un buen desempeño  $F1 > 0.95$  para clasificar la clase H, hongo *Septoria lycopersici*, puesto que este patógeno provoca en las hojas del tomate manchas cafés con contornos amarillos muy distintivos. Para la clase A, ácaro *Tetranychus urticae*, se obtuvo un valor de  $F1 > 0.89$  debido a que no existe una diferencia notable con la clase S (Cuadro 3).

**Cuadro 2.** Hiperparámetros óptimos obtenidos por medio de una búsqueda por retícula y validación cruzada de los clasificadores máquina de soporte vectorial (SVM), perceptrón multicapa (MLP) y potenciación del gradiente (HGB).

Clasificador	Hiperparámetro	Óptimo
SVM	C	50
	kernel	rbf <sup>t</sup>
	Gamma	10
	fd <sup>¶</sup>	ovr <sup>§</sup>
MLP	Co	150
	fa <sup>b</sup>	Relu
	optimizador	Adam
	ta <sup>¶</sup>	0.001
	alfa	0.0001
HGB	ta <sup>¶</sup>	0.1
	mhn <sup>††</sup>	31
	mp <sup>¶¶</sup>	11
	mmh <sup>§§</sup>	15

<sup>t</sup>rbf: kernel Gaussiano; <sup>¶</sup>fd: función de decisión; <sup>§</sup>ovr: uno versus resto; <sup>b</sup>fa: función de activación; <sup>¶</sup>ta: tasa de aprendizaje; <sup>††</sup>mhn: máximo número de hojas por nodo; <sup>¶¶</sup>mp: máxima profundidad; <sup>§§</sup>mmh: máximo número de muestras por hoja.

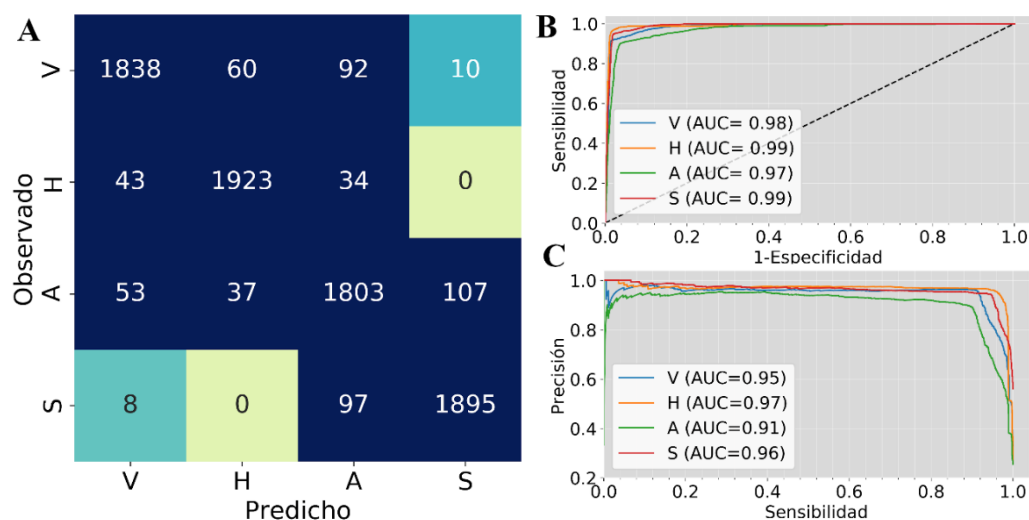
**Cuadro 3.** Desempeño de los clasificadores máquina de soporte vectorial (SVM), perceptrón multicapa (MLP) y potenciación del gradiente (HGB); métricas precisión (P), sensibilidad (S), puntaje (F1) para cada clase objetivo.

Modelo	Clase	P	S	F1	AUC <sub>ROC</sub>	AUC <sub>P-S</sub>
SVM	V <sup>†</sup>	0.95	0.92	0.93	0.98	0.95
	H <sup>¶</sup>	0.95	0.96	0.96	0.99	0.97
	A <sup>§</sup>	0.89	0.90	0.90	0.97	0.91
	S <sup>p</sup>	0.94	0.95	0.94	0.99	0.96
MLP	V	0.95	0.91	0.93	0.99	0.98
	H	0.95	0.96	0.95	1.00	0.99
	A	0.89	0.90	0.90	0.98	0.95
	S	0.94	0.96	0.95	0.99	0.98
HGB	V	0.94	0.91	0.93	0.99	0.98
	H	0.95	0.96	0.95	1.00	0.99
	A	0.88	0.90	0.89	0.98	0.94
	S	0.94	0.95	0.94	0.99	0.98

<sup>†</sup>V: virus del rizado amarillo de la hoja del tomate; <sup>¶</sup>H: hongo *Septoria lycopersici*; <sup>§</sup>A: ácaro *Tetranychus urticae*; <sup>p</sup>S: hoja sana.

Los tres modelos obtuvieron un desempeño similar (Cuadro 3), la clase H hongo *Septoria lycopersici* se identificó con mayor eficiencia, y con menor eficiencia la clase A, ácaro *Tetranychus urticae*. SVM obtuvo el puntaje más alto de F1 = 96 % y HGB obtuvo el menor puntaje F1 = 89 %. A nivel de clase, las métricas de desempeño fueron muy similares.

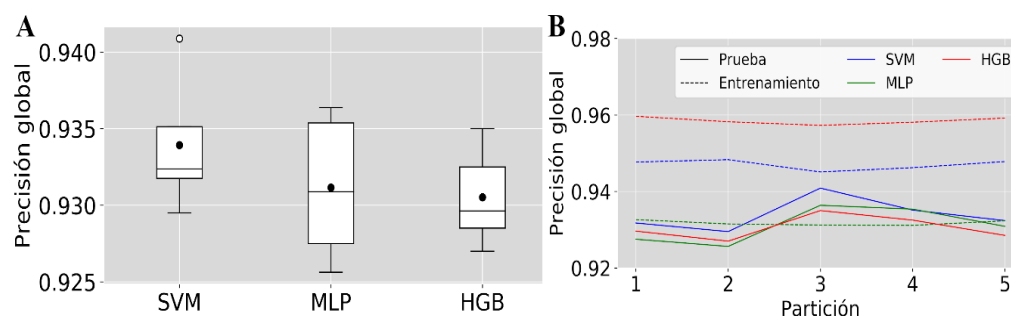
La matriz de confusión de SVM para un conjunto de prueba de 8000 muestras aleatorias describe un total de 7459 pixeles clasificados correctamente con Acc = 93.2 % (Figura 3A). Las curvas ROC y P-S confirmaron que SVM obtuvo mejor desempeño para clasificar la clase H y el menor para la clase A (Figura 3B y 3C). Las matrices de confusión de los clasificadores RF y HGB fueron muy similares a SVM.



**Figura 3.** Desempeño del clasificador máquina de soporte vectorial (SVM). A: matriz de confusión; B: curvas ROC; C: curvas P-S precisión *versus* sensibilidad. Clases objetivo: virus del rizado amarillo de la hoja del tomate (V), hongo *Septoria lycopersici* (H), ácaro *Tetranychus urticae* (A), y hoja sana (S).

La evaluación final del desempeño de los clasificadores SVM, MLP y HGB se realizó con una VC,  $p = 5$  particiones aleatorias de 32 000 muestras para entrenamiento y 8000 para la prueba en predicción con base en la métrica Acc. La comparación de los tres clasificadores muestra que, en términos de la mediana y la media, Acc fue superior a 93 % (Figura 4A).

Los clasificadores SVM, MLP y HGB no presentaron problemas de sobre ajuste de los datos. Esto ocurre cuando el clasificador alcanza un desempeño muy alto con el conjunto de entrenamiento y bajo desempeño con el conjunto de prueba o predicción. El clasificador HGB obtuvo las diferencias más grandes de Acc en entrenamiento y prueba, en las cinco particiones aleatorias de VC; sin embargo, estas diferencias no reflejan un problema de sobre ajuste (Figura 4B).



**Figura 4.** Comparación del desempeño de los clasificadores obtenido con validación cruzada  $k = 5$  particiones. A: gráfica de cajas; B: precisión global de clasificación (Acc) de los clasificadores máquina de soporte vectorial (SVM), perceptrón multicapa (MLP) y potenciación del gradiente (HGB) en entrenamiento y prueba para cada partición  $k$ .

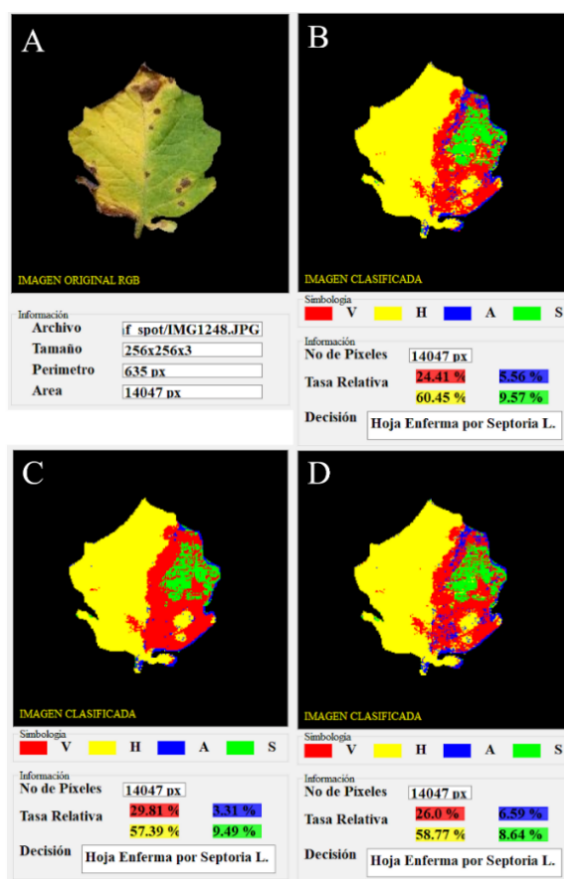
SVM obtuvo en entrenamiento  $\text{Acc} = 0.947 (\pm 0.001)$  y en prueba  $0.934 (\pm 0.004)$ . MLP alcanzó en entrenamiento  $\text{Acc} = 0.932 (\pm 0.001)$  y en prueba  $0.931 (\pm 0.005)$ ; HGB alcanzó en entrenamiento  $\text{Acc} = 0.959 (\pm 0.001)$  y en prueba  $0.931 (\pm 0.003)$ . Con base en la precisión global  $\text{Acc}$  promedio, los tres clasificadores obtuvieron un desempeño en predicción muy similar, *i.e.* SVM (93.4 %), MLP (93.2 %) y HGB (93.1 %). La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis se aplicó para comparar la respuesta en el desempeño  $\text{Acc}$  de los de tres clasificadores con cinco repeticiones, y se obtuvo  $\text{ji-cuadrada} = 1.34$ ,  $\text{df} = 2$ ,  $\text{p-value} = 0.5117$ , por lo cual se constata que no existen diferencias significativas en su desempeño.

En cuanto al desempeño alcanzado por los tres clasificadores,  $\text{Acc}$  fue superior a 93 % y fue aceptable para identificar las enfermedades descritas y bajo las condiciones de adquisición de las imágenes de hojas; en términos de tiempo de cómputo, SVM y HGB son algoritmos más rápidos que MLP, y SVM fue más estable en entrenamiento y prueba (Figura 4B). SVM, MLP y HGB representan tres paradigmas de aprendizaje automático supervisado diferentes. SVM se fundamenta en un proceso de optimización cuadrático (Smola y Schölkop, 2004; Vapnik, 1995), MLP en un modelo de aproximación no lineal (Ramchoun *et al.*, 2016) y HGB se sustenta en un enfoque geométrico de árboles de decisión de ensamble (Friedman, 2001). La relación precisión *versus* tiempo de cómputo de un algoritmo de aprendizaje automático con respecto a los paradigmas de aprendizaje profundo es muy superior; sin embargo, para incrementar aún más la capacidad predictiva de los algoritmos de aprendizaje, el uso de aprendizaje profundo es una opción viable con un costo computacional mayor (Saleem *et al.*, 2019; Padol y Yadav, 2016).

#### Predicción de enfermedades en nuevas imágenes de hojas

La herramienta computacional IDENTO v1.0 facilita la identificación de enfermedades con base en los modelos aprendizaje óptimos utilizados en esta investigación. La identificación consiste en dos etapas, la primera procesa una imagen RGB para

segmentar la hoja del fondo (homogéneo); luego, la segunda utiliza la hoja segmentada para clasificar e identificar la enfermedad de tomate. Los clasificadores SVM, MLP y HGB se activan desde la plataforma Python y predicen la enfermedad. La capacidad predictiva de IDENTO v1.0 se ilustró con una nueva imagen de hoja de tomate de la base de datos consultada para este estudio, que no se utilizó en las etapas de entrenamiento y prueba de los clasificadores, de 256 x 256 píxeles con tres canales de color R, G, B (Figura 5A). Los tres clasificadores coincidieron en indicar como agente causal de los síntomas a *Septoria lycopersici*. La diferencia en la precisión global Acc de los modelos origina un cambio en la distribución de los píxeles por clase. La clase H con SVM obtuvo la mayor cantidad de píxeles predichos 60.5 % (Figura 5B) y MLP obtuvo la menor con 57.4 % (Figura 5C). Dado que la diferencia en las proporciones de píxeles es pequeña, las salidas se visualizan muy similares.



**Figura 5.** Identificación de tres enfermedades en hojas de tomate con base en los clasificadores máquina de soporte vectorial (SVM), perceptrón multicapa (MLP) y potenciación del gradiente (HGB). A: imagen de la hoja de tomate preprocesada; B: identificación con SVM; C: identificación con MLP; D: identificación con HGB.

La herramienta incorpora reglas de decisión heurísticas obtenidas por prueba y error para identificar la enfermedad más relevante con base en la tasa relativa de píxeles (TR); esto es la proporción de píxeles de una clase entre el total de píxeles en la hoja. Si TR es mayor que 70 % para la clase S, se identifica como hoja sana. Si TR es mayor que 35 % para la clase V se identifica como hoja enferma del TYLCV, si TR es mayor que 17 % para la clase H se identifica como hoja enferma por *Septoria lycopersici*, mientras que si TR es mayor que 20 % para A se identifica como hoja enferma por *Tetranychus urticae*. Los umbrales de TR se definieron en función del análisis de múltiples TR que se obtuvieron al ejecutar la predicción sobre el conjunto de imágenes de prueba analizado, la precisión global de clasificación fue superior a 93 % (Kulkarni *et al.*, 2021).

### CONCLUSIONES

Los tres clasificadores máquina de soporte vectorial (SVM), perceptrón multicapa (MLP) y potenciación del gradiente (HGB) alcanzaron una precisión global (Acc) superior a 93 % para predecir las clases objetivo: virus del rizado amarillo de la hoja del tomate (V), hongo *Septoria lycopersici* (H), ácaro *Tetranychus urticae* (A) y hojas sanas (S). El hongo *Septoria lycopersici* se clasificó con un puntaje F1 = 96 %, las hojas sanas con F1 = 95 %, virus del rizado amarillo de la hoja del tomate con F1 = 93 % y el ácaro *Tetranychus urticae* con F1 = 90 %.

La herramienta computacional IDENTO v1.0 desarrollada facilita la aplicación práctica de los modelos de aprendizaje evaluados para realizar la identificación de las enfermedades estudiadas en hojas de tomate con base en las reglas heurísticas propuestas. La guía de usuario del programa se encuentra disponible en <https://github.com/JPAAPSEICOA/Manual-IA-IMAGE-PROV1.0>. Este estudio muestra la importancia de la aplicación de los paradigmas de aprendizaje automático a partir de las imágenes digitales para la identificación de enfermedades.

### REFERENCIAS

- Abdullah NE, Rahim AA, Hashim H, Kamal MM. 2007. Classification of rubber tree leaf diseases using multilayer perceptron neural network. *In* 2007 5th Student Conference on Research and Development. IEEE Xplore: Selangor, Malaysia, pp: 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2007.4451369>
- Ambrosio-Ambrosio JP, González-Camacho JM. (2022). IDENTO v1.0: una herramienta computacional para identificación automática de enfermedades en hojas de tomate. Colegio de Postgraduados. INDAUTOR, registro: 03-2022-061711283400-01.
- Atienza R. 2020. Advanced deep learning with TensorFlow 2 and Keras (Second edition). Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK. 491 p.
- Camagra F, Vinciarelli A. 2015. Machine learning for audio, image and video analysis (Second edition). Springer: London, UK. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6735-8>
- Cuevas E, Zaldivar D, Pérez-Cisneros M. 2010. Procesamiento digital de imágenes usando Matlab & Simulink. Alfaomega: Ciudad de México, México. 815 p.
- Deisenroth MP, Faisal AA, Ong CS. 2020. Mathematics for machine learning. Cambridge University Press: Cambridge, UK. 407 p. <https://mml-book.com> (Recuperado: abril 2021).
- Dey S. 2020. Python image processing cookbook. Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK. 438 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2021. Production/yield quantities of tomatoes in world + (total) 1994–2019. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize> (Recuperado: mayo 2018).

- Friedman JH. 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics* 29 (5): 1189–1232.
- Fuentes A, Yoon S, Kim SC, Park DS. 2017. A robust deep learning-based detector for real time tomato plant diseases and pests recognition. *Sensors* 17 (9): 1–21. <https://doi.org/10.3390/s17092022>
- Géron A. 2019. *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow* (Second edition). O’Reilly Media, Inc.: Sebastopol, CA, USA. 819 p.
- Hand DJ, Till RJ. 2001. A simple generalisation of the area under the ROC curve for multiple class classification problems. *Machine Learning* 45: 171–186. <https://doi.org/10.1023/A:1010920819831>
- Hughes DP, Salathé M. 2015. An open access repository of images on plant health to enable the development of mobile disease diagnostics. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.08060>
- Kulkarni V, Gawali M, Kharat A. 2021. Key technology considerations in developing and deploying machine learning models in clinical radiology practice. *JMIR Medical Informatics* 9 (9): e28776. <https://doi.org/10.2196/28776>
- Li W, Du Y, Li H, Wang X, Zhu J. 2015. Decision tree algorithm based on regional growth for the automatic oil field road. *Proceedings of Science* 6: 1–7.
- Padol PB, Yadav AA. 2016. SVM classifier based grape leaf disease detection. *In* 2016 Conference on Advances in Signal Processing. IEEE Xplore: Pune, India, pp: 175–179. <https://doi.org/10.1109/CASP.2016.7746160>
- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V *et al.* 2011. Scikit-learn: machine learning in python. *Journal of Machine Learning Research* 12: 2825–2830.
- Pérez-Hedo M, Arias-Sanguino AM, Urbaneja A. 2018. Induced tomato plant resistance against *Tetranychus urticae* triggered by the phytophagy of *Nesidiocoris tenuis*. *Frontiers in Plant Science* 9: 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01419>
- Powers DM. 2011. Evaluation: from precision, recall and f-measure to roc, informedness, markedness & correlation. *Journal of Machine Learning Technologies* 2 (1): 37–63.
- Prasad A, Sharma N, Hari-Gowthem G, Muthamilarasan M, Prasad M. 2020. Tomato yellow leaf curl virus: impact, challenges, and management. *Trends in Plant Science* 25 (9): 897–911. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.03.015>
- Ramchoun H, Janati MA, Ghanou Y, Ettaouil M. 2016. Multilayer perceptron: architecture optimization and training. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence* 4 (1): 1–5. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2016.415>
- Raschka S, Mirjalili V. 2017. *Python Machine Learning* (Second edition). Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK. 850 p.
- Raschka S. 2018. Model evaluation, model selection, and algorithm selection in machine learning. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.12808>
- Rosenblatt F. 1958. *The Perceptron: a theory of statistical separability in cognitive systems* (Project Para). Cornell Aeronautical Laboratory: Washington, DC, USA. 268 p.
- Saleem MH, Potgieter J, Arif KM. 2019. Plant disease detection and classification by deep learning. *Plants* 8 (11): 468. <https://doi.org/10.3390/plants8110468>
- Seminis. 2017. *Tomato disease field guide*. Seminis Vegetable Seeds. Inc. De Ruiter: St. Louis, MO, USA, 168 p. [https://issuu.com/sureshlm9/docs/tomato\\_disease\\_guide](https://issuu.com/sureshlm9/docs/tomato_disease_guide) (Recuperado: mayo 2021).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2021. *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México, México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Recuperado: mayo 2021).
- Smola AJ, Schölkopf B. 2004. A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing* 14: 199–222. <https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88>
- Vapnik VN. 1995. *The nature of statistical learning theory*. Springer: New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2440-0>

## BIOACTIVITY OF *Pseudomarasmius nidus-avis* AND OTHER WILD FUNGI FROM MESOPHYTIC MOUNTAIN FOREST IN MEXICO IN CONTROL OF PHYTOPATHOGENS

J. Francisco **Castillo-Esparza**<sup>1</sup>, Leticia **Montoya**<sup>1\*</sup>, Damaris **Desgarenes**<sup>1</sup>, Gloria **Carrión**<sup>1</sup>, Antero **Ramos**<sup>1</sup>, Enrique **César**<sup>2</sup>, Randy **Ortiz-Castro**<sup>3</sup>, Victor M. **Bandala**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ecología A. C. Red de Biodiversidad y Sistemática. Carretera Antigua a Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, Mexico. C. P. 91073.

<sup>2</sup> Instituto de Ecología A. C. Herbario XAL. Carretera Antigua a Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, Mexico. C. P. 91073.

<sup>3</sup> Instituto de Ecología A. C. Red de Estudios Moleculares Avanzados. Carretera Antigua a Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, Mexico. C. P. 91073.

\* Author for correspondence: leticia.montoya@inecol.m

### ABSTRACT

The mesophytic mountain forest is one of the most biodiverse ecosystems in Mexico, in which there is a diverse mycobiota of which many aspects of its biology and properties are unknown. *Pseudomarasmius nidus-avis* is a recently discovered and described fungus that forms rhizomorphs used in the nesting habits of birds of the family Tyrannidae (*Mionectes oleagineus* and *Tolmomyias sulfureus*). In this work, the bioactive properties of *P. nidus-avis*, seven basidiomycetes and two wild ascomycetes from the mesophytic mountain forest of central Veracruz state, Mexico, were evaluated in terms of their effect against phytopathogenic fungal (PF) species such as *Fusarium oxysporum* (ATCC-417 and CBF-185), *Sclerotium cepivorum* (CBF-414) and *Leptosphaerulina australis* (CBF-433), which generate important economic losses in several crops. *In vitro* confrontation tests of mycelium isolated from the macrofungi against the PFs were developed, where 50 % of the wild fungi, including *P. nidus-avis*, showed effect on the phytopathogens. Furthermore, the crude extract obtained from the mycelium and supernatant of *P. nidus-avis* was evaluated against PF, showing an inhibition of 16.08 % against *F. oxysporum* (ATCC-417). These results show that *P. nidus-avis* has bioactive properties with potential for use in the control of some PF diseases of agricultural and forestry importance.

**Keywords:** Antagonistic fungi, biological activity, Basidiomycota, Ascomycota.

### INTRODUCTION

The mesophytic mountain forest (MMF) is considered one of the most biodiverse terrestrial ecosystems in Mexico, but it is also one of the most threatened in the country. The central region of Veracruz, in eastern Mexico, presents an archipelago of MMF remnants, which persist under strong pressure from changes in land use. However, despite their current state, these forest fragments still harbor a rich biota, which represent important carbon resource pools (Liu *et al.*, 2018) and include a rich

**Citation:** Castillo-Esparza JF, Montoya L, Desgarenes D, Carrión G, Ramos A, César E, Ortiz-Castro R, Bandala VM. 2023. Bioactivity of *Pseudomarasmius nidus-avis* and other wild fungi from the mesophytic mountain forest of Mexico in the control of phytopathogens.

*Agrociencia* 57(3): 508-535. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2864>

**Editor in Chief:**

Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: July 21, 2022.

Approved: January 30, 2023.

**Published in *Agrociencia*:**

May 04, 2023.

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



diversity of fungal metabolites with unknown and scarcely investigated properties in Mexico (Espinosa-García *et al.*, 2021).

The Bosque de Niebla Sanctuary (BNS), a peri-urban natural protected area under the care of the Instituto de Ecología A.C., corresponds to one of these MMF patches in central Veracruz. It presents a rich community of macrofungi, among which new species of different taxonomic groups have been discovered (Bandala *et al.*, 2016; César *et al.*, 2018; Montoya *et al.*, 2019), most of them endemic and not yet studied in terms of their bioactivity. Such is the case of *Pseudomarasmius nidus-avis*, a recently discovered endemic species of this site, of special interest due to its ecological function (César *et al.* 2018).

This species like other gymnopiodes fungi, forms rhizomorphs, which are structures built by aggregates of linear hyphae with an apical growing point and a melanized cortex (Yafetto, 2018). These structures, resembling long, black horsehair, are important decomposers that bind litter particles and move nutrients in forest soils (Peay *et al.*, 2016). Furthermore, several bird species actively collect rhizomorphs to build their nests (Aubrecht *et al.*, 2013), the additional value of this behavior has been explained in terms of a putative antibacterial and antifungal activity of rhizomorphs, which increases the chances of survival of the bird's offspring (Aubrecht *et al.*, 2013). However, the potential bioactivity of *P. nidus-avis* has not yet been tested.

There are reports of wild fungi (WF) species with different types of bioactivity, such as antibacterial, antifungal, antiviral, anti-allergenic, anti-inflammatory, antiatherogenic, immunomodulatory, hallucinogenic, and plant growth promoter (Suay *et al.*, 2000; Finimundy *et al.*, 2014; Sandargo *et al.*, 2019; Castillo-Esparza *et al.*, 2021). On the other hand, there are reports of macrofungal species with potential activity against economically important phytopathogenic fungi (PF) (Anusiya *et al.*, 2021). Some important PFs in Mexico are *Fusarium oxysporum*, *Sclerotium cepivorum* and *Leptosphaerulina australis*, fungi of common occurrence in agriculturally important crops. *Fusarium* species are soil-borne plant pathogenic fungi that cause vascular wilt and root diseases in a wide range of economically important crops, such as tomato (Gamboa-Becerra *et al.*, 2021). *Sclerotium cepivorum* is an ascomycete that can cause white rot, which is one of the most destructive diseases, affecting both onion and garlic bulbs in most parts of the world (Amin *et al.*, 2014). On the other hand, *Leptosphaerulina australis* causes serious diseases in economically important crops such as maize, rice, banana, wheat and sugarcane (Phookamsak *et al.*, 2013).

This work explores the potential of some species of wild fungi present in the MMF of Veracruz, Mexico, as a control of phytopathogenic fungi that cause damage and economic losses in crops of global importance. In addition, it was considered important to evaluate the possible bioactive properties of *P. nidus-avis* based on César *et al.* (2018). Two types of experiments were conducted: 1) essays using dual culture technique with mycelium, and 2) response of phytopathogenic strains against methanolic extract obtained from the fruiting body, mycelium, and supernatant of the wild fungi culture.

## MATERIALS AND METHODS

### Sampling and taxonomic identification of wild fungi

Fruiting bodies of 10 wild fungi species were collected during a period between March and June 2019 at BNS, a MMF protected area located at an altitude of 1343 m in Xalapa, central region of the state of Veracruz, on the east coast of Mexico (19° 30' 46.38" N, 96° 56' 32.64" W). Samples were recorded, labeled and herborized for further study following the recommendations of Lodge *et al.* (2004). Taxonomic identification of the collected specimens was based on macro- and microscopic morphological characteristics according to Moser (1983) and Pegler (1983), among other specialized literature. Microscopic observations were made on dry material mounted with 3% KOH, 1% Congo red aqueous solution and Melzer's solution (Largent *et al.*, 1977).

### Mycelium isolation

For mycelial isolation, an internal fragment of both the petiole and stipe of the collected fruiting bodies was placed on potato dextrose agar (PDA) medium under axenic conditions (Suay *et al.*, 2000). After transferring the fungal tissue to Petri dishes, the cultures were incubated at 20-25 °C in dark conditions for 7-30 days until complete colonization.

### Molecular identification

DNA extraction from mycelium isolated from fruiting bodies was carried out according to César *et al.* (2018). Molecular identification was performed by amplification of the internal transcribed spacer (ITS) region of nuclear ribosomal DNA using primers ITS1F, ITS5/ITS4 (Gardes and Bruns, 1993). PCR conditions and amplified products were sequenced according to César *et al.* (2018). The sequences obtained were analyzed using the Blast program and deposited in the GenBank database (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank>).

### Dual tests against phytopathogenic fungi

Tests against PF with WF isolates were performed using a dual culture technique (Kumar and Kaushik, 2013) on PDA, as this medium favors PF growth. Four PF strains were used, provided by the Laboratory of the Pilot Plant for the Development of Biological Control Agents, Instituto de Ecología A.C., which come from three crops of agricultural importance in the region. Two strains of *Fusarium oxysporum* (CBF-185 and ATCC-417) were isolated from tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Stromatinia cepivora* (*Sclerotium cepivorum*) (CBF-414) was isolated from garlic (*Allium sativum* L.) and *Leptosphaerulina australis* (CBF-433) from a local variety of semi-wild bell pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in coffee plantations under the shade of MMF tree species. The fungi were cultured and confronted in Petri dishes. Fragments of mycelium of 5 mm in diameter from each fungus, previously growing for seven days, were placed in Petri dishes, keeping 4 cm between the two fungi. Each confrontation was carried

out in triplicate. The boxes were incubated at 25 °C in dark conditions for seven days. Subsequently, the plates were observed, and the antagonistic effect was recorded as an inhibition zone was present at the point of interaction of the two strains (Kumar and Kaushik, 2013). Based on Luo *et al.* (2015), six scales were established for the width of the growth inhibition zone (T): T= negative (-) when the PFs exceed the WF, T= positive (+) when there is a barrier between the two fungi, T= (++) if the separation is  $\leq 2$  mm, T= (+++) when  $\leq 5$  mm and  $> 2$  mm, T= (++++) when  $> 5$  mm, and ND= not determined.

#### **Selection of culture medium for mycelium growth**

Due to the slow growth of some of the WF on PDA, seven different liquid culture media were tested. The *Lentinus crinitus* strain (Cesar 16) was used to select the appropriate medium and obtain higher biomass in less time (Table 1). All culture media were adjusted to a pH of 5.8 before sterilization (121 °C for 20 min). Flasks containing 100 mL of culture medium were inoculated with 15-day-old mycelium culture fragments of 5 mm in diameter. Cultures were incubated at 25 °C for 30 days under dark conditions, with three replicates per treatment. Subsequently, the contents of the flasks were filtered and centrifuged at 4500 rpm (Hermle Z 326 K, Germany) and the biomass weight was recorded.

#### **Extraction of active compounds from fruiting bodies, mycelium and fungal supernatant**

Fruiting bodies were air-dried at 45 °C, ground to a fine powder using the Tissue Lyser II (Qiagen, USA) at 30 Hz s<sup>-1</sup>, and stored until use. Alternatively, flasks were inoculated with 250 mL of V8 liquid culture medium [30 % V8 juice (Campbell's®) 4 g CaCO<sub>3</sub>], with 5 mm diameter mycelial fragments from 15 days of previous growth. Cultures were incubated at 25 °C for 30 days under dark conditions and were subsequently filtered and centrifuged at 4500 rpm (Hermle Z 326 K, Germany) to separate the broth from the mycelium (Aqueveque *et al.*, 2016).

The mycelium of the isolated strains was freeze-dried and ground, the supernatant of each culture was frozen and freeze-dried. The crude extract of the samples (fruiting bodies, mycelium and supernatant) was extracted by shaking with methanol (1 mL per 50 mg of sample) at room temperature overnight at 100 rpm, then filtered through Whatman paper (#1). The filtered extracts were concentrated in a Centrivap (Labconco, USA) under vacuum at 30 °C to remove methanol and then lyophilized and weighed. The freeze-dried powders were stored until use (Castillo-Esparza *et al.*, 2021).

#### **Antifungal activity of the methanolic extract of wild fungi**

The crude extract of fruiting bodies, mycelium and supernatant of each WF species sample was evaluated against phytopathogenic fungal strains using the agar well diffusion method (Samuel *et al.*, 2011). A 5 mm diameter hole was made in Petri dishes with 25 ml of PDA and 100  $\mu$ L of the crude extract was poured into the hole. Likewise, 100  $\mu$ L of methanol and dimethyl sulfoxide (DMSO) was used as a negative control, and 100  $\mu$ L of ketokonazole (16  $\mu$ g mL<sup>-1</sup>) was used as a positive control. The extract

**Table 1.** Mycelium production of *Lentinus crinitus* in different culture media.

Culture medium	Medium composition (g/L)	Yield in lyophilized weight (mg)a	Figure
Modified Melin-Norkrans medium (Version 1)	CaCl <sub>2</sub> 0.05, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.0358, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 0.50, NaCl 0.025, malt extract 3.0, sucrose 10.0 and glucose 4.0	19.4 ± 0.77	
Modified Melin-Norkrans medium (Version 2)	Glucose 14.0, malt extract 3.0, CaCl <sub>2</sub> 0.05, NaCl 0.025, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 0.5, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.15, FeCl <sub>3</sub> 1.2	18.6 ± 0.97	
Modified Pridham-Gottlieb medium.	Glucose 10.0, casein peptone 3.33, yeast extract 0.67, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 0.264, K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 0.628, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.33, CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O 0.002, MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O 0.0006; ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.0005 y FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.0004	444.4 ± 8.82	
Medium V8	30 % V8 juice (Campbell's®), CaCO <sub>3</sub> 4.0	991 ± 21.08	
Potato and dextrose broth medium	Dextrose 20 and potato infusion 6.5	134.8 ± 7.21	
Modified Melin-Norkrans medium (Version 2) with 10 % V8 juice (Campbell's®)	Melin-Norkrans (Version 2) and 10 % of V8 juice	211.9 ± 25.43	
Pridham-Gottlieb modified with 10 % of V8 juice (Campbell's®)	Pridham-Gottlieb and 10 % of V8 juice	529.5 ± 55.51	

and the controls were diffused in the culture medium overnight at 4 °C. After the diffusion period, an agar disk with 7-day-old mycelia of the phytopathogenic strains was placed on the plates. All tests were conducted in triplicate.

### Statistical data analysis

For all experiments, data analysis was performed in SPSS 10 program (SPSS, Chicago, MI, USA). A one-way analysis of variance (ANOVA) with a Tukey's post hoc test was used to test for differences in radial growth responses of PFs.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Wild fungi studied

A total of 30 WF specimens were collected from which 10 pure strains were obtained for confrontation tests against PF (Table 2). It is worth noting that one of the isolates, according to the molecular results, corresponds to the filamentous fungus *Clonostachys* sp., an ascomycete mycoparasite isolated from *Gymnopus iocephalus* that generates interest in the biological control of pests.

**Table 2.** Wild fungi studied and their antifungal activity against phytopathogenic fungi using the dual culture technique.

Strain	Accession	Taxon	Potential antifungal activity			
			<i>F. oxysporum</i> CBF-185	<i>F. oxysporum</i> ATCC-417	<i>S. cepivorum</i>	<i>L. australis</i>
César 44	MT232391	<i>Marasmiellus diaphanus</i> César, Bandala & Montoya	+++	ND	-	ND
César 45	MW173021	<i>Pseudomarasmius nidus-</i> <i>avis</i> (E. César, Bandala & Montoya) R.H. Petersen	++++	++++	-	++++
César 47	MW173022	<i>Marasmius</i> sp.	-	ND	-	ND
César 49	MT232389	<i>Gymnopus brunneiniger</i> César, Bandala & Montoya	++	ND	-	ND
César 16	MW165498	<i>Lentinus crinitus</i> (L.) Fr	+++	+++	+	+
Ramos 822	MW173023	<i>Artomyces pyxidatus</i> (Pers.) Jülich	-	-	-	-
Ramos 823	MW173024	<i>Auricularia nigricans</i> (Sw.) Birkebak, Looney & Sánchez-García	-	-	-	-
Dorantes 06	MW173025	<i>Daldinia</i> sp.	-	-	-	-
Montoya 5471b	MW173026	<i>Clonostachys</i> sp.	+	+	+	+
Montoya 5472	MW173027	<i>Panus conchatus</i> (Bull.) Fr.	-	-	-	-

Width of the growth inhibition zone (T): T= negative (-) when PFs exceed WF; T= (+) when there is a barrier between both fungi; T= (++) when ≤ 2 mm; T= (+++) when ≤ 5 mm and >2 mm; T= (++++) when > 5 mm; ND= not determined.

### Effect of wild fungi against phytopathogens

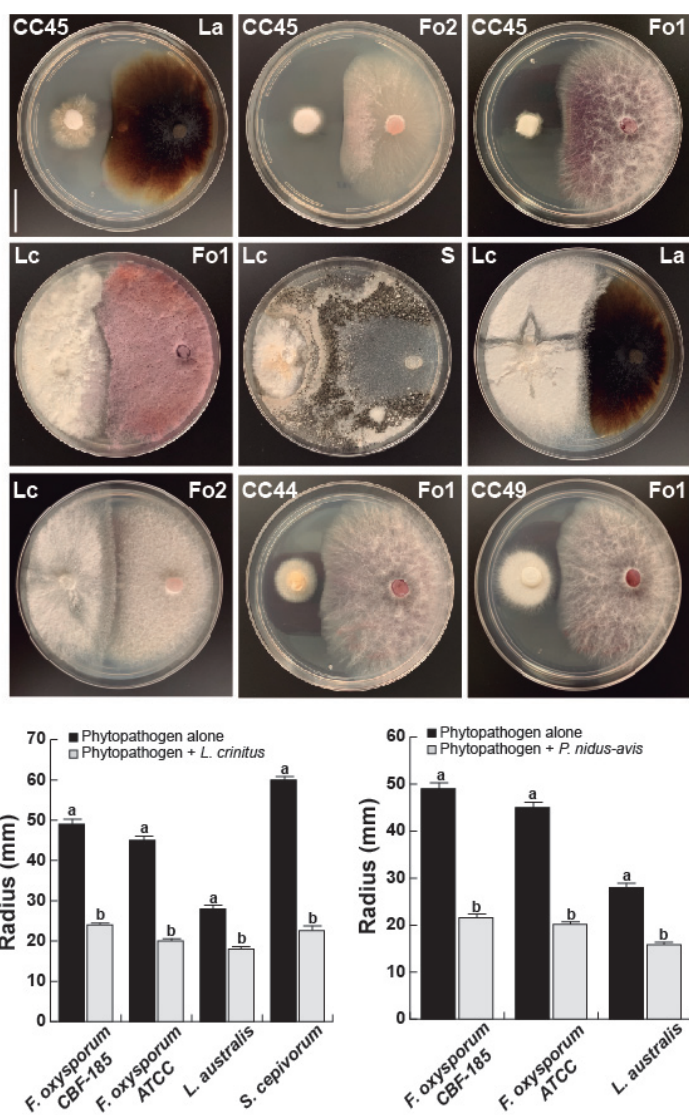
Antifungal activity was present in 5 of the 10 WF evaluated (50 %) by the dual culture test (Table 2), which affected the growth of the phytopathogenic strains. One of the fungi that showed effect is *Clonostachys* sp. (Montoya 5471b), which is characterized by being endophytic and saprotrophic in soil. It can produce volatile organic compounds that are toxic to some fungi, bacteria and even insects (Flores *et al.*, 2015). In dual confrontations, *Clonostachys* sp. exhibited a weak inhibitory effect against *Fusarium oxysporum* (CBF-185), *F. oxysporum* ATCC-417, *Leptosphaerulina australis* and *Sclerotium cepivorum* (Table 2). In a previous dual antagonism study (Flores *et al.*, 2015), *Clonostachys* sp. showed some antagonism effect against *F. oxysporum*. Their colonization was similar in our study, filling 75 % of the Petri dishes, but our results were recorded considering the width of the inhibition barrier. However, considering the width of the inhibition barrier, it presented a much lower inhibitory effect against *Fusarium* than other species of macrofungi studied, such as *Marasmiellus diaphanus* (César 44) and *Gymnopus brunneiniger* (César 49), although they only inhibited the development of *F. oxysporum* (CBF-185) (Figure 1).

The strains of *Pseudomarasmius nidus-avis* (César 45) and *Lentinus crinitus* (César 16) showed the highest range of inhibition against the phytopathogenic fungal strains used in the present study, compared to the rest of the isolates obtained. These two strains (*P. nidus-avis* and *L. crinitus*) showed that there was a difference in the behavior and growth rate of the phytopathogens: *Fusarium oxysporum* CBF-185, *F. oxysporum* ATCC-417, *Leptosphaerulina australis* and *Sclerotium cepivorum*, in the presence or absence of mycelium of *P. nidus-avis* and *L. crinitus* for nine days (Figures 1 and 2).

In the dual essay, *Lentinus crinitus* (César 16) showed a weak inhibition effect against *Sclerotium cepivorum* and *Leptosphaerulina australis*. This result was superior in the dual confrontation against ATCC-417 and CBF-185 strains of *Fusarium oxysporum* (Table 2). Considering the intrinsic growth rate of each PF, a stronger inhibitory effect was observed against *S. cepivorum* followed by *F. oxysporum* ATCC-417, *F. oxysporum* CBF-185 and *L. australis* (Figures 1 and 2). After nine days of incubation, the phytopathogens were unable to overcome the mycelium of *L. crinitus*.

In the case of *Pseudomarasmius nidus-avis*, a significant effect on the growth rate of three phytopathogens was recorded. The greatest effect was observed against *Fusarium oxysporum* CBF-185, followed by *F. oxysporum* ATCC-417 and *Leptosphaerulina australis*. Confrontations were measured for nine days but were observed for more than 15 days and the phytopathogens did not cross the mycelial barrier of *P. nidus-avis*. The results obtained with the *P. nidus-avis* strain are relevant for the antifungal effect against *Fusarium oxysporum* and *Leptosphaerulina australis*, supporting the observation of César *et al.* (2018) on the probable antagonistic behavior of fungal rhizomorphs of this species on nests of birds belonging to the family Tyrannidae.

*Lentinus crinitus* and *Pseudomarasmius nidus-avis* showed an effect against three and two PF species, respectively. In the case of *L. crinitus*, despite having a broad spectrum of activity with the three species of PF (Table 2), it is clearly shown that in both strains



**Figure 1.** Dual *in vitro* assays between wild fungi isolated from mesophytic forest against phytopathogenic fungi of agricultural interest. CC45: *Pseudomarasmium nidus-avis*; La: *Leptosphaerulina australis*; Fo2: *Fusarium oxysporum* ATCC-417; Fo1: *F. oxysporum* CBF-185; Lc: *Lentinus crinitus*; S: *Sclerotium cepivorum*; CC44: *Marasmiellus diaphanus*; CC49: *Gymnopus brunneiniger*. Different letters indicate significant differences ( $p \leq 0.05$ ).

of *F. oxysporum* (CBF-185 and ATCC-417) there is a greater zone of inhibition with respect to the other two species, so it could be suggested that *L. crinitus* is a candidate for the control of *F. oxysporum*, with the possibility of acting against other non-specific PFs. Therefore, a thorough investigation of the metabolites of this species is necessary to determine which ones are involved in PF inhibition and their possible mechanism of action. On the other hand, *Pseudomarasmium nidus-avis* had the same effect in the zone of inhibition for both PF species (*F. oxysporum* and *Leptosphaerulina australis*).

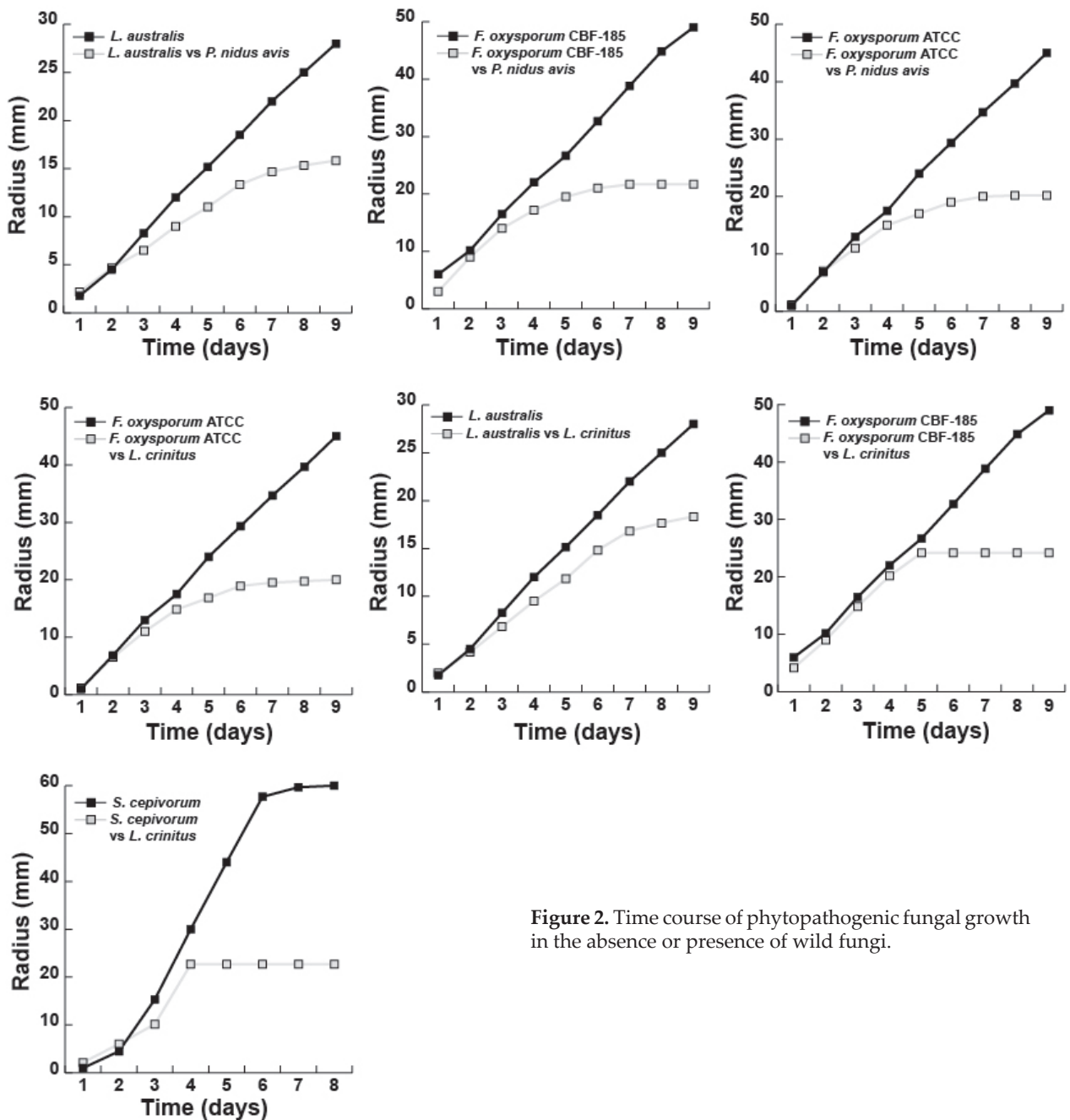


Figure 2. Time course of phytopathogenic fungal growth in the absence or presence of wild fungi.

However, it had no effect on *Sclerotium cepivorum*, suggesting some specificity and efficacy against PF species that may share some characteristics. Therefore, further investigation of the bioactive properties of *P. nidus-avis* and a detailed analysis of the metabolic profile for its use in the control of PF are required.

### **Mycelium production in liquid culture**

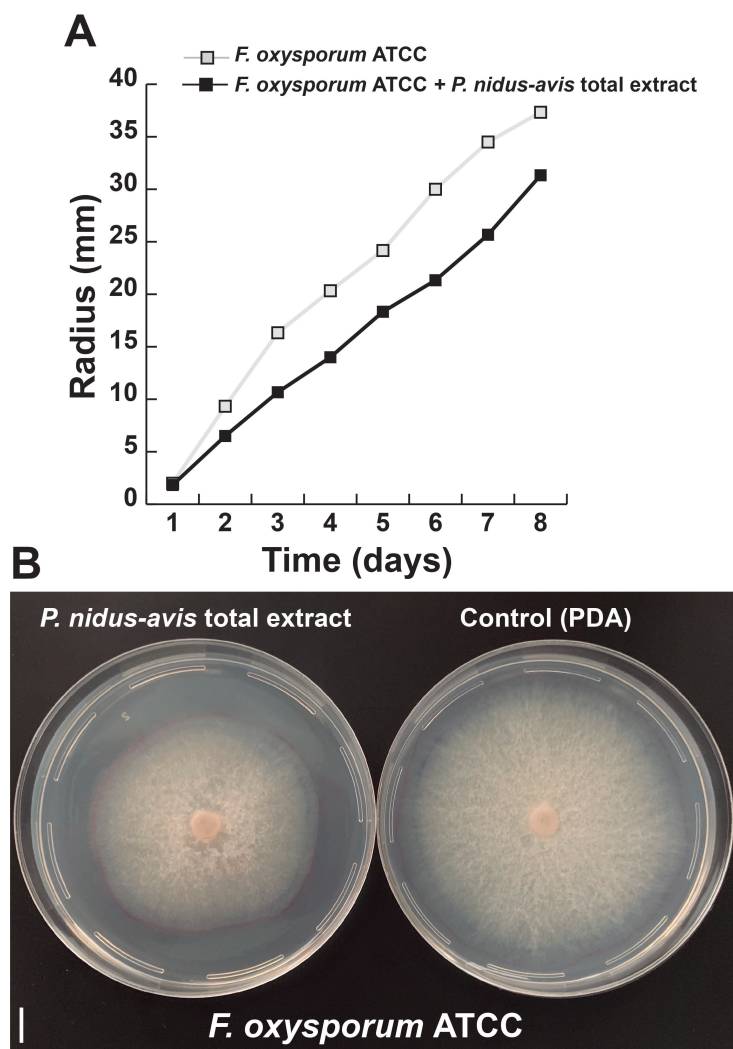
The biomass obtained from César strain 16 (*Lentinus crinitus*) was analyzed in seven different liquid culture media, with the V8 medium at 30 % being the one with the highest mycelial yield recorded. Furthermore, the addition of a percentage of V8 to the other media contributed to increased biomass (Table 1). This was clearly observed in the mycelium of César strain 16, with a >10-fold increase in biomass on modified Melin-Norkrans medium (Version 2) with 10 % V8 juice (Campbells), relative to Melin-Norkrans medium (Version 2). Similarly, there was a slight increase in biomass of mycelium grown on modified Pridham-Gottlieb medium with 10 % V8 juice compared to Pridham-Gottlieb medium without V8 juice. With respect to Melin-Norkrans medium (Version 1 and 2) and potato dextrose broth, there was no mycelium production (biomass) comparable to the 30% V8 juice culture medium (Table 1).

### **Effect of the crude extract against phytopathogenic fungi.**

To test the effect of metabolites present in crude extracts against PFs, higher amounts of biomass were produced by probing in different liquid culture media (Table 1). Of the 10 WF, the strains *L. crinitus* (César 16) and *P. nidus-avis* (César 45) were selected for presenting the highest values in the dual clashes against PFs. Due to the scarcity of biomass of the minute fruiting bodies of *P. nidus-avis*, only the isolated mycelium and culture supernatant were analyzed. Methanolic extracts of the fruiting body, supernatant and mycelium of *Lentinus crinitus*, as well as mycelium and supernatant of *Pseudomarasmius nidus-avis*, were tested against four PF strains.

There was no effect of extracts obtained from the fruiting body, mycelium, and supernatant of *L. crinitus* on PF. This could be due to the fact that some secondary metabolites produced by *L. crinitus* are only expressed in the presence of competition for the culture medium, as there are reports of some *Lentinus* species with inhibitory effect against phytopathogens (Rojas-Ramírez, 2013; Vásquez *et al.*, 2018). On the other hand, it should be noted that there is a possibility that the lack of effect of *L. crinitus* extract on PFs is also due to the type of solvent used, since the solvent determines the type of metabolites extracted. Dual confrontation assays revealed that *L. crinitus* has activity against various PFs, which makes it a candidate for use in the control of different fungal diseases. However, it is necessary to determine which metabolites are produced in the presence of other fungi and which ones produce an inhibitory effect on phytopathogens.

On the other hand, the methanolic extract of *P. nidus-avis* mycelium tested against the four PFs had no effect. In contrast, the *P. nidus-avis* supernatant extract showed an inhibition effect of 16.08 % against *F. oxysporum* ATCC-417 (Figure 3A and 3B). This result is relevant since *F. oxysporum* strain ATCC-417 is responsible for wilting and death of plants characterized by secreting effector proteins in the xylem, called SIX (Secreted in Xylem), which contribute to its virulence. Growth inhibition of *F. oxysporum* (ATCC-417) with the methanolic extract of *P. nidus-avis* culture supernatant shows an interesting potential for biological control of this fungus containing nine of the fourteen SIX genes (Gamboa-Becerra *et al.*, 2021).



**Figure 3.** Time course of *F. oxysporum* ATCC-417 growth in the absence or presence of *Pseudomarasmius nidus-avis* supernatant extract. A: Growth inhibition of *F. oxysporum* ATCC-417 in the presence of 100  $\mu$ L of the crude extract of the supernatant of *P. nidus-avis*; B: Representative photographs of the growth of *F. oxysporum* ATCC-417 in the presence of crude extract of *P. nidus-avis* supernatant.

It is known that fungi can modify the production of secondary metabolites depending on several characteristics, such as the medium in which they grow, incubation conditions, C:N sources and concentrations, and the extraction solvent. Competitive behavior and damage can also affect their secondary metabolic profile (Bertrand *et al.*, 2014). The differences observed in this study between the effect of dual confrontations and methanol extractions could be associated with some of these conditions.

## CONCLUSIONS

Due to the harmful effects of synthetic pesticides, it is urgent to find new alternatives for pest control agents of biological origin and low environmental impact. The present results suggest that MMF WF species have potential for application in agriculture. In particular, *Pseudomarasmius nidus-avis*, a fungus endemic to Veracruz, has great potential for use in the biological control of pests caused by microorganisms.

*P. nidus-avis* showed a greater antifungal effect against *Leptosphaerulina australis* and two strains of *Fusarium oxysporum* than the other wild fungi tested. Furthermore, the methanolic extract obtained from the supernatant of *P. nidus-avis* also had an inhibitory effect on the development of strain ATCC-417, which by containing 9 *SIX* genes makes it one of the most pathogenic strains. Therefore, it would be of great interest to investigate the mechanism of action of *P. nidus-avis*, in addition to its spectrum on other phytopathogens. The current tests and results proved the bioactivity of *P. nidus-avis*, which could provide some evidence on the advantages of the selection of this fungal species in the interaction with birds of the family Tyrannidae during nesting.

## ACKNOWLEDGMENTS

We thank Dr. Roberto Gamboa-Becerra, M. Sc. Nut Liahut-Guín, M. Sc. Zelene Durán-Barradas for her support in the isolation, micro- and macroscopic and molecular characterization of phytopathogenic fungi and to Biol. David Ramos Rendón for technical assistance. This research was supported by grants CB 252431 for the study of tropical fungal species in Veracruz, Mexico, FORDECYT-PRONACES/CF 263959 and PDCPN 2015-882 from CONACyT-Mexico.

## REFERENCES

- Amin M, Tadele S, Selvaraj T. 2014. White rot (*Sclerotium cepivorum* Berk) an aggressive pest of onion and garlic in Ethiopia: An overview. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development* 6 (1): 6–15. <https://doi.org/10.5897/JABSD2013.0210>
- Anusiya G, Gowthama Prabu U, Yamini NV, Sivarajasekar N, Rambabu K, Bharath G, Banat F. 2021. A review of the therapeutic and biological effects of edible and wild mushrooms. *Bioengineered* 12 (2): 11239–11268. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2001183>
- Aqueveque P, Céspedes CL, Alarcón J, Schmeda-Hirschmann G, Cañumir JA, Becerra J, Silva M, Sterner O, Radrigán R, Aranda M. 2016. Antifungal activities of extracts produced by liquid fermentations of Chilean *Stereum* species against *Botrytis cinerea* (grey mould agent). *Crop Protection* 89: 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.07.014>
- Aubrecht G, Huber W, Weissenhofer A. 2013. Coincidence or benefit? The use of *Marasmius* (horse-hair fungus) filaments in bird nests. *Avian Biology Research* 6 (1): 26–30. <https://doi.org/10.3184/175815512X13531739538638>
- Bandala VM, Montoya L, Ramos A. 2016. Two new *Lactarius* species from a subtropical cloud forest in eastern Mexico. *Mycologia* 108 (5): 967–980. <https://doi.org/10.3852/15-310>
- Bertrand S, Bohni N, Schnee S, Schumpp O, Gindro K, Wolfender JL. 2014. Metabolite induction via microorganism co-culture: a potential way to enhance chemical diversity for drug discovery. *Biotechnology Advances* 32 (6): 1180–1204. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.03.001>
- Castillo-Esparza JF, Bandala VM, Ramos A, Desgarennes D, Carrión G, César E, Montoya L, Ortiz-Castro R. 2021. *Pisolithus tinctorius* extract affects the root system architecture through compound production with auxin-like activity in *Arabidopsis thaliana*. *Rhizosphere* 19: 100397. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100397>

- César E, Bandala VM, Montoya L, Ramos A. 2018. A new *Gymnopus* species with rhizomorphs and its record as nesting material by birds (Tyrannidae) in the subtropical cloud forest from eastern Mexico. *MycKeys* 42: 21–34. <https://doi.org/10.3897/mycokeys.42.28894>
- Espinosa-García V, Mendoza G, Shnyreva AV, Padrón JM, Trigos A. 2021. Biological activities of different strains of the genus *Ganoderma* spp. (Agaricomycetes) from Mexico. *International Journal of Medicinal Mushrooms* 23 (2): 67–77. <https://doi.org/10.1615/intjmedmushrooms.2021037451>
- Finimundy TC, Dillon AJP, Henriques JAP, Ely MR. 2014. A review on general nutritional compounds and pharmacological properties of the *Lentinula edodes* mushroom. *Food and Nutrition Sciences* 5 (12): 1095–1105. <http://dx.doi.org/10.4236/fns.2014.512119>
- Flores W, Chico J, Cerna L. 2015. Actividad antagónica *in vitro* de *Clonostachys rosea* sobre *Fusarium oxysporum*, *Alternaria solani* y *Botrytis cinerea*. *Revista de Investigación Científica* 35 (1): 34–42.
- Gamboa-Becerra R, López-Lima D, Villain L, Breidler JC, Carrión G, Desgarennes D. 2021. Molecular and environmental triggering factors of pathogenicity of *Fusarium oxysporum* and *F. solani* isolates involved in the coffee corky-root disease. *Journal of Fungi* 7 (4): 253. <https://doi.org/10.3390/jof7040253>
- Gardes M, Bruns TD. 1993. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes application to the identification of mycorrhizae and rusts. *Molecular ecology* 2 (2): 113–118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.1993.tb00005.x>
- Kumar S, Kaushik N. 2013. Endophytic fungi isolated from oil-seed crop *Jatropha curcas* produces oil and exhibit antifungal activity. *PLoS ONE* 8 (2): e56202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056202>
- Largent D, Johnson D, Watling R. 1977. How to identify mushrooms to genus III: microscopic features. Mad River Press: Eureka, CA, USA. 148 p.
- Liu X, Trogisch S, He JS, Niklaus PA, Bruelheide H, Tang Z, Erfmeier A, Scherer-Lorenzen M, Pietsch KA, Yang B *et al.* 2018. Tree species richness increases ecosystem carbon storage in subtropical forests. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285 (1885): 20181240. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1240>
- Lodge DJ, Ammirati J, O’Dell TE, Mueller GM. 2004. Collecting and describing macrofungi. *In* *Biodiversity of fungi: inventory and monitoring methods*. Mueller G, Foster GM, Bills GF (eds.). Elsevier Academic Press: San Diego, CA, USA, pp: 128–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-509551-8.X5000-4>
- Luo ZP, Lin HY, Ding WB, He HL, Li YZ. 2015. Phylogenetic Diversity and Antifungal Activity of Endophytic Fungi Associated with *Tephrosia purpurea*. *Mycobiology* 43 (4): 435–443. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2015.43.4.435>
- Montoya L, Garay-Serrano E, Bandala VM. 2019. Two new species of *Phylloporus* (Fungi, Boletales) from tropical *Quercus* forests in eastern Mexico. *MycKeys* 51: 107–123. <https://doi.org/10.3897/mycokeys.51.33529>
- Moser M. 1983. Keys to agarics and boleti (Fourth edition). Mad River Press: Eureka, CA, USA. 535 p.
- Phookamsak R, Liu JK, Chukeatirote E, McKenzie EH, Hyde KD. 2013. Phylogeny and morphology of *Leptosphaerulina saccharicola* sp. nov. and *Pleosphaerulina oryzae* and relationships with *Pithomyces*. *Cryptogamie Mycologie* 34 (4): 303–319. <https://doi.org/10.7872/crym.v34.iss4.2013.303>
- Peay KG, Kennedy PG, Talbot JM. 2016. Dimensions of biodiversity in the Earth mycobiome. *Nature Reviews Microbiology* 14 (7): 434–447. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.59>
- Pegler DN. 1983. The genus *Lentinus*: a world monograph. Kew Publishing: London, UK. 281 p.
- Rojas-Ramírez L. 2013. Los basidiomicetos: una herramienta biotecnológica promisoría con impacto en la agricultura. *Fitosanidad* 17 (1): 49–55.
- Samuel P, Prince L, Prabakaran P. 2011. Antibacterial activity of marine derived fungi collected from South East Coast of Tamilnadu, India. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research* 1 (4): 86–94.

- Sandargo B, Chepkirui C, Cheng T, Chaverra-Muñoz L, Thongbai B, Stadler M, Hüttel S. 2019. Biological and chemical diversity go hand in hand: Basidiomycota as source of new pharmaceuticals and agrochemicals. *Biotechnology Advances* 37 (6): 107344. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.01.011>
- Suay I, Arenal F, Asensio FJ, Basilio A, Cabello MA, Díez MT, García JB, González del Val A, Gorrochategui J, Hernández P *et al.* 2000. Screening of basidiomycetes for antimicrobial activities. *Antonie van Leeuwenhoek* 78: 129–140. <https://doi.org/10.1023/A:1026552024021>
- Vásquez R, Rios N, Solano G, Cubilla-Rios L. 2018. Lentinoids A–D, new natural products isolated from *Lentinus strigellus*. *Molecules* 23 (4): 773. <https://doi.org/10.3390/molecules23040773>
- Yafetto L. 2018. The structure of mycelial cords and rhizomorphs of fungi: A mini-review. *Mycosphere* 9 (5): 984–998. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/9/5/3>

## BIOACTIVIDAD DE *Pseudomarasmius nidus-avis* Y OTROS HONGOS SILVESTRES DEL BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA DE MÉXICO EN EL CONTROL DE FITOPATÓGENOS

J. Francisco Castillo-Esparza<sup>1</sup>, Leticia Montoya<sup>1\*</sup>, Damaris Desgarenes<sup>1</sup>, Gloria Carrión<sup>1</sup>, Antero Ramos<sup>1</sup>, Enrique César<sup>2</sup>, Randy Ortiz-Castro<sup>3</sup>, Victor M. Bandala<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ecología A. C. Red de Biodiversidad y Sistemática. Carretera Antigua a Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, México. C. P. 91073.

<sup>2</sup> Instituto de Ecología A. C. Herbario XAL. Carretera Antigua a Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, México. C. P. 91073.

<sup>3</sup> Instituto de Ecología A. C. Red de Estudios Moleculares Avanzados. Carretera Antigua a Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, México. C. P. 91073.

\* Autor para correspondencia: leticia.montoya@inecol.m

### RESUMEN

El bosque mesófilo de montaña es uno de los ecosistemas con mayor biodiversidad en México, en el cual existe una micobiota diversa de la que se desconocen muchos aspectos de su biología y propiedades. *Pseudomarasmius nidus-avis* es un hongo recientemente descubierto y descrito, que forma rizomorfos utilizados en los hábitos de anidación de aves de la familia Tyrannidae (*Mionectes oleagineus* y *Tolmomyias sulfurescens*). En el presente trabajo se evaluaron las propiedades bioactivas de *P. nidus-avis*, siete basidiomicetos y dos ascomicetos silvestres del bosque mesófilo de montaña del centro del estado de Veracruz, México, en términos de su efecto contra especies fitopatógenas de hongos (HF) como *Fusarium oxysporum* (ATCC-417 y CBF-185), *Sclerotium cepivorum* (CBF-414) y *Leptosphaerulina australis* (CBF-433), las cuales generan importantes pérdidas económicas en varios cultivos. Se desarrollaron pruebas de confrontación *in vitro* de micelio aislado de los macrohongos contra los HF, donde el 50 % de los hongos silvestres, incluido *P. nidus-avis*, mostraron efecto sobre los fitopatógenos. Además, el extracto crudo obtenido del micelio y sobrenadante de *P. nidus-avis* fue evaluado frente a los HF, mostrando una inhibición de 16.08 % contra *F. oxysporum* (ATCC-417). Estos resultados muestran que *P. nidus-avis* tiene propiedades bioactivas con potencial para ser utilizadas en el control de algunas enfermedades causadas por HF de importancia agrícola y forestal.

**Palabras clave:** Hongos antagonicos, actividad biológica, Basidiomycota, Ascomycota.

### INTRODUCCIÓN

El bosque mesófilo de montaña (BMM) es considerado entre los ecosistemas terrestres más biodiversos de México, pero también es uno de los más amenazados del país. La región central de Veracruz, al oriente de México, presenta un archipiélago de remanentes de BMM, que perduran bajo fuerte presión por cambios en el uso del suelo. Sin embargo, a pesar de su estado actual, esos fragmentos forestales aún albergan una rica biota, que representa importantes reservas de recursos de carbono (Liu *et al.*, 2018) e

**Citation:** Castillo-Esparza JF, Montoya L, Desgarenes D, Carrión G, Ramos A, César E, Ortiz-Castro R, Bandala VM. 2023. Bioactividad de *Pseudomarasmius nidus-avis* y otros hongos silvestres del bosque mesófilo de montaña de México en el control de fitopatógenos. *Agrociencia* 57(3): 508-535. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2864>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: July 21, 2022.  
Approved: January 30, 2023.  
Published in *Agrociencia*:  
May 04, 2023.

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



incluyen una rica diversidad de metabolitos fúngicos con propiedades desconocidas y escasamente investigadas en México (Espinosa-García *et al.*, 2021).

El Santuario de Bosque de Niebla (SBN), un área natural periurbana protegida a cargo del Instituto de Ecología A.C., corresponde a uno de esos parches de BMM en el centro de Veracruz. Presenta una rica comunidad de macrohongos, entre los que se han descubierto nuevas especies de diferentes grupos taxonómicos (Bandala *et al.*, 2016; César *et al.*, 2018; Montoya *et al.*, 2019), la mayoría de ellas endémicas y aún no estudiadas en cuanto a su bioactividad. Tal es el caso de *Pseudomarasmius nidus-avis*, especie endémica de este sitio recientemente descubierta, de especial interés debido a su función ecológica (César *et al.* 2018).

Esta especie al igual que otros hongos gymnopiodes, forma rizomorfos, que son estructuras construidas por agregados de hifas lineales con un punto de crecimiento apical y una corteza melanizada (Yafetto, 2018). Estas estructuras, con apariencia de largas y negras crines de caballo, son importantes descomponedores que aglutinan partículas de la hojarasca y trasladan nutrientes en los suelos de los bosques (Peay *et al.*, 2016). Además, varias especies de aves recolectan activamente rizomorfos para construir sus nidos (Aubrecht *et al.*, 2013), el valor adicional de este comportamiento se ha explicado en términos de una supuesta actividad antibacteriana y antimicótica de los rizomorfos, lo que aumenta las posibilidades de supervivencia de las crías del ave (Aubrecht *et al.*, 2013). Sin embargo, la bioactividad potencial de *P. nidus-avis* aún no ha sido probada.

Hay reportes de especies de hongos silvestres (HS) con diferentes tipos de bioactividad, tales como antibacteriana, antifúngica, antiviral, antialérgica, antiinflamatoria, antiaterogénica, inmunomoduladora, alucinógena y promotora del crecimiento vegetal (Suay *et al.*, 2000; Finimundy *et al.*, 2014; Sandargo *et al.*, 2019; Castillo-Esparza *et al.*, 2021). Por otro lado, existen reportes de especies de macrohongos con actividad potencial contra hongos fitopatógenos (HF) de importancia económica (Anusiya *et al.*, 2021). Algunos HF importantes en México son *Fusarium oxysporum*, *Sclerotium cepivorum* y *Leptosphaerulina australis*, hongos de común ocurrencia en cultivos de importancia agrícola. Las especies de *Fusarium* son hongos patógenos de plantas transmitidos a través del suelo, que causan marchitez vascular y enfermedades de las raíces en una amplia gama de cultivos económicamente importantes, como el tomate (Gamboa-Becerra *et al.*, 2021). *Sclerotium cepivorum* es un ascomiceto que puede causar la pudrición blanca, la cual es una de las enfermedades más destructivas, ya que afecta bulbos tanto de cebolla como de ajo en la mayor parte del mundo (Amin *et al.*, 2014). Por otro lado, *Leptosphaerulina australis* causa enfermedades graves en cultivos económicamente importantes como maíz, arroz, banano, trigo y caña de azúcar (Phookamsak *et al.*, 2013). En este trabajo se explora el potencial de algunas especies de hongos silvestres presentes en el BMM de Veracruz, México, como control de hongos fitopatógenos que causan daños y pérdidas económicas en cultivos de importancia mundial. Además, se consideró importante evaluar las posibles propiedades bioactivas de *P. nidus-avis* con base en César *et al.* (2018). Se llevaron a cabo dos tipos de experimentos: 1) ensayos

mediante técnica de cultivo dual con micelio, y 2) respuesta de cepas fitopatógenas frente al extracto metanólico obtenido del cuerpo fructífero, micelio, y sobrenadante del cultivo de hongos silvestres.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Muestreo e identificación taxonómica de hongos silvestres

Se recolectaron cuerpos fructíferos de 10 especies de hongos silvestres durante un periodo entre marzo y junio del 2019 en el SBN, un área protegida de BMM ubicada a una altitud de 1343 m en Xalapa, región centro del estado de Veracruz, en la costa este de México (19° 30' 46.38" N, 96° 56' 32.64" O). Las muestras fueron registradas, etiquetadas y herborizadas para su posterior estudio siguiendo las recomendaciones de Lodge *et al.* (2004). La identificación taxonómica de los especímenes recolectados se basó en características morfológicas macro- y microscópicas de acuerdo con Moser (1983) y Pegler (1983), entre otra literatura especializada. Las observaciones microscópicas se realizaron sobre material seco montado con KOH al 3 %, solución acuosa de rojo Congo al 1 % y solución de Melzer (Largent *et al.*, 1977).

### Aislamiento de micelio

Para el aislamiento del micelio, un fragmento interno tanto del píleo como del estípite de los cuerpos fructíferos recolectados se colocó en medio agar papa dextrosa (PDA) en condiciones axénicas (Suay *et al.*, 2000). Después de transferir el tejido fúngico a las placas de Petri, los cultivos se incubaron a 20–25 °C en condiciones de oscuridad de 7 a 30 días hasta la colonización completa.

### Identificación molecular

La extracción de ADN del micelio aislado de los cuerpos fructíferos se llevó a cabo de acuerdo con César *et al.* (2018). La identificación molecular se efectuó mediante la amplificación de la región del espaciador interno transcrito (ITS) del ADN ribosómico nuclear, utilizando los cebadores ITS1F, ITS5/ITS4 (Gardes y Bruns, 1993). Las condiciones de PCR y los productos amplificados se secuenciaron de acuerdo con César *et al.* (2018). Las secuencias obtenidas fueron analizadas mediante el programa Blast y se depositaron en la base de datos GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank>).

### Pruebas duales contra hongos fitopatógenos

Las pruebas contra HF con aislados de HS se realizaron mediante una técnica de cultivo dual (Kumar y Kaushik, 2013) en PDA, ya que este medio favorece el crecimiento de HF. Se utilizaron cuatro cepas de HF, proporcionadas por el Laboratorio de la Planta Piloto para el Desarrollo de Agentes de Control Biológico, Instituto de Ecología, las cuales proceden de tres cultivos de importancia agrícola en la región. Se aislaron dos cepas de *Fusarium oxysporum* (CBF-185 y ATCC-417) de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Stromatinia cepivora* (*Sclerotium cepivorum*) (CBF-414) se aisló de ajo (*Allium sativum*

L.) y *Leptosphaerulina australis* (CBF-433) de una variedad local de pimiento semisilvestre (*Capsicum annuum* L.) cultivado en cafetales bajo la sombra de especies arbóreas del BMM.

Los hongos fueron cultivados y confrontados en cajas de Petri. Se colocaron fragmentos de micelio de 5 mm de diámetro de cada hongo, previamente en crecimiento durante siete días en cajas de Petri, manteniendo 4 cm entre ambos hongos. Cada confrontación se realizó por triplicado. Las cajas se incubaron a 25 °C en condiciones de oscuridad durante siete días. Posterior a ello, se observaron las placas y se registró el efecto antagónico al presentarse una zona de inhibición en el punto de interacción de las dos cepas (Kumar y Kaushik, 2013). Con base en Luo *et al.* (2015), se establecieron seis escalas para el ancho de la zona de inhibición del crecimiento (T): T= negativo (-) cuando los HF sobrepasan el HS, T= positivo (+) cuando existe una barrera entre ambos hongos, T= (++) si la separación es  $\leq 2$  mm, T= (+++) cuando es  $\leq 5$  mm y  $> 2$  mm, T= (++++) cuando es  $> 5$  mm, y ND= no determinado.

#### **Selección del medio de cultivo para el crecimiento del micelio**

Debido al lento crecimiento de algunos de los HS en PDA, se probaron siete medios de cultivo líquido diferentes. Se utilizó la cepa *Lentinus crinitus* (César 16) para seleccionar el medio apropiado y obtener mayor biomasa en menor tiempo (Cuadro 1). Todos los medios de cultivo se ajustaron a un pH de 5.8 antes de la esterilización (121 °C durante 20 min). Se inocularon matraces que contenían 100 mL de medio de cultivo con fragmentos de cultivo de micelio de 5 mm de diámetro de 15 días de edad. Los cultivos se incubaron a 25 °C durante 30 días en condiciones de oscuridad, con tres repeticiones por tratamiento. Posteriormente, el contenido de los matraces se filtró y centrifugó a 4500 rpm (Hermle Z 326 K, Alemania) y se registró el peso de la biomasa.

#### **Extracción de compuestos activos de cuerpos fructíferos, micelio y sobrenadante fúngico**

Los cuerpos fructíferos se secaron con aire a 45 °C, se trituraron hasta obtener un polvo fino usando el Tissue Lyser II (Qiagen, EUA) a 30 Hz s<sup>-1</sup>, y se almacenaron hasta su uso. Alternativamente, se inocularon matraces con 250 mL de medio de cultivo líquido V8 [30 % jugo V8 (Campbell's®) 4 gr de CaCO<sub>3</sub>], con fragmentos de micelio de 5 mm de diámetro de 15 días de crecimiento previo. Los cultivos se incubaron a 25 °C durante 30 días en condiciones de oscuridad, y fueron posteriormente filtrados y centrifugados a 4500 rpm (Hermle Z 326 K, Alemania) para separar el caldo del micelio (Aqueveque *et al.*, 2016).

El micelio de las cepas aisladas fue liofilizado y molido, el sobrenadante de cada cultivo fue congelado y liofilizado. El extracto crudo de las muestras (cuerpos fructíferos, micelio y sobrenadante) se extrajo por agitación con metanol (1 mL por 50 mg de muestra) a temperatura ambiente durante toda la noche a 100 rpm, posteriormente se filtró a través de papel Whatman (#1). Los extractos filtrados se concentraron en un Centrivap (Labconco, EUA) al vacío a 30 °C para eliminar el metanol y luego se

**Cuadro 1.** Producción de micelio de *Lentinus crinitus* en diferentes medios de cultivo.

Medio de cultivo	Composición del medio (g/L)	Rendimiento en peso liofilizado (mg)a	Figura
Medio Melin-Norkrans modificado (Versión 1)	CaCl <sub>2</sub> 0.05, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.0358, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 0.50, NaCl 0.025, extracto de malta 3.0, sacarosa 10.0 y glucosa 4.0	19.4 ± 0.77	
Medio Melin-Norkrans modificado (Versión 2)	Glucosa 14.0, extracto de malta 3.0, CaCl <sub>2</sub> 0.05, NaCl 0.025, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 0.5, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.15, FeCl <sub>3</sub> 1.2	18.6 ± 0.97	
Medio Pridham-Gottlieb modificado.	Glucosa 10.0, peptona de caseína 3.33, extracto de levadura 0.67, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 0.264, K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 0.628, MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.33, CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O 0.002, MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O 0.0006, ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.0005 y FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O 0.0004	444.4 ± 8.82	
Medio V8	30 % jugo V8 (Campbell's®), CaCO <sub>3</sub> 4.0	991 ± 21.08	
Medio de caldo papa y dextrosa	Dextrosa 20 e infusión de papas 6.5	134.8 ± 7.21	
Medio Melin-Norkrans modificado (Versión 2) con 10 % de jugo V8 (Campbell's®)	Melin-Norkrans (Versión 2) y 10 % de jugo V8	211.9 ± 25.43	
Pridham-Gottlieb modificado con 10 % de jugo V8 (Campbell's®)	Pridham-Gottlieb y 10 % de jugo V8	529.5 ± 55.51	

liofilizaron y pesaron. Los polvos liofilizados se almacenaron hasta su uso (Castillo-Esparza *et al.*, 2021).

#### **Actividad antifúngica del extracto metanólico de los hongos silvestres**

El extracto crudo de los cuerpos fructíferos, micelio y sobrenadante de cada muestra de especies de HS se evaluó frente a cepas fitopatógenas de hongos utilizando el método de difusión en pozo de agar (Samuel *et al.*, 2011). Se realizó un orificio de 5 mm de diámetro en cajas de Petri con 25 ml de PDA y se vertieron en el orificio 100  $\mu\text{L}$  del extracto crudo. Asimismo, se utilizó como control negativo 100  $\mu\text{L}$  de metanol y dimetilsulfóxido (DMSO), y como control positivo, 100  $\mu\text{L}$  de ketokonazol ( $16 \mu\text{g mL}^{-1}$ ). El extracto y los controles se difundieron en el medio de cultivo durante la noche a  $4^\circ\text{C}$ . Después del período de difusión se colocó sobre las placas un disco de agar con micelio de siete días de edad de las cepas fitopatógenas. Todas las pruebas se realizaron por triplicado.

#### **Análisis de datos estadísticos**

Para todos los experimentos, el análisis de datos se realizó en el programa SPSS 10 (SPSS, Chicago, MI, EUA). Se utilizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con una prueba post hoc de Tukey para probar las diferencias en las respuestas de crecimiento radial de los HF.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **Hongos silvestres estudiados**

Se recolectaron un total de 30 ejemplares de HS, de los cuales se obtuvieron 10 cepas puras para las pruebas de confrontación contra HF (Cuadro 2). Cabe señalar que uno de los aislamientos, según los resultados moleculares, corresponde al hongo filamentos *Clonostachys* sp., un micoparásito ascomiceto aislado de *Gymnopus iocephalus* que genera interés en el control biológico de plagas.

#### **Efecto de los hongos silvestres contra fitopatógenos**

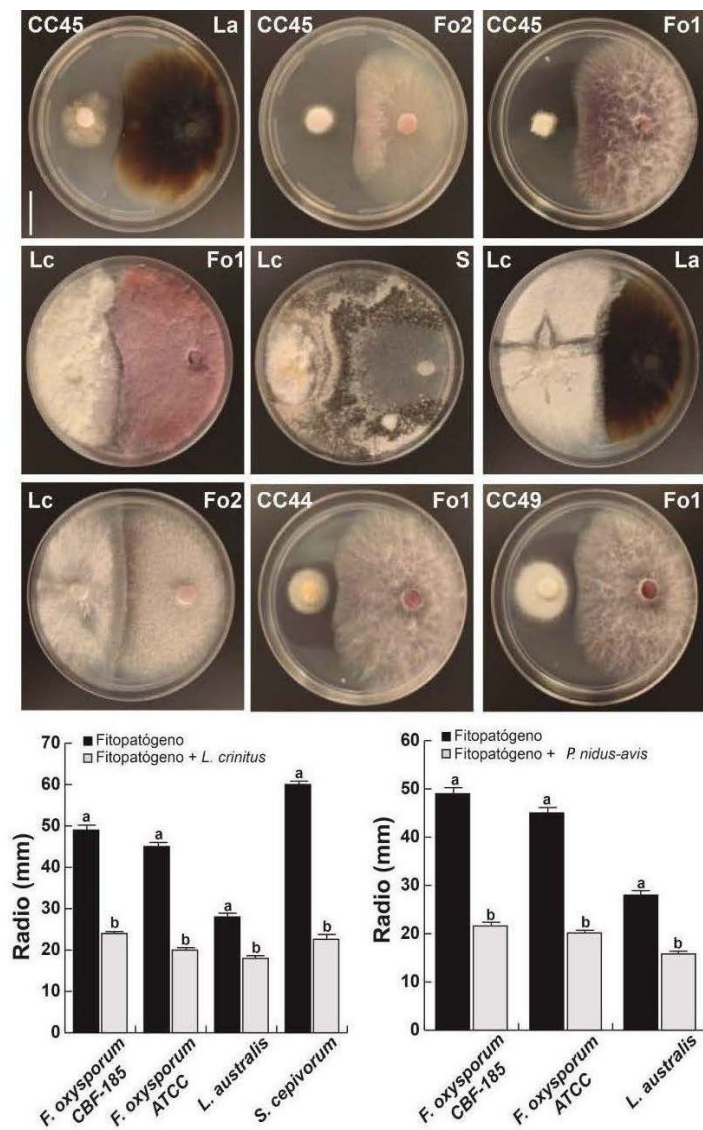
Se presentó actividad antifúngica en 5 de los 10 HS evaluados (50 %) por la prueba de cultivo dual (Cuadro 2), los cuales afectaron el crecimiento de las cepas fitopatógenas. Uno de los hongos que mostró efecto es *Clonostachys* sp. (Montoya 5471b), el cual se caracteriza por ser endófito y saprótrofo en suelo. Puede producir compuestos orgánicos volátiles que son tóxicos para algunos hongos, bacterias e incluso insectos (Flores *et al.*, 2015). En confrontaciones duales, *Clonostachys* sp. exhibió un efecto inhibitorio débil contra *Fusarium oxysporum* (CBF-185), *F. oxysporum* ATCC-417, *Leptosphaerulina australis* y *Sclerotium cepivorum* (Cuadro 2). En un estudio previo de antagonismo dual (Flores *et al.*, 2015), *Clonostachys* sp. presentó cierto efecto de antagonismo contra *F. oxysporum*. Su colonización fue similar en nuestro estudio, llenando el 75 % de las cajas de Petri, pero nuestros resultados se registraron considerando el ancho de la barrera

**Cuadro 2.** Hongos silvestres estudiados y su actividad antifúngica frente a hongos fitopatógenos mediante la técnica de cultivo dual.

Cepa	Accesión	Taxón	Potencial de actividad antifúngica			
			<i>F. oxysporum</i> CBF-185	<i>F. oxysporum</i> ATCC-417	<i>S. cepivorum</i>	<i>L. australis</i>
César 44	MT232391	<i>Marasmiellus diaphanus</i> César, Bandala & Montoya	+++	ND	-	ND
César 45	MW173021	<i>Pseudomarasmius nidus-avis</i> (E. César, Bandala & Montoya) R.H. Petersen	++++	++++	-	++++
César 47	MW173022	<i>Marasmius</i> sp.	-	ND	-	ND
César 49	MT232389	<i>Gymnopus brunneiniger</i> César, Bandala & Montoya	++	ND	-	ND
César 16	MW165498	<i>Lentinus crinitus</i> (L.) Fr	+++	+++	+	+
Ramos 822	MW173023	<i>Artomyces pyxidatus</i> (Pers.) Jülich	-	-	-	-
Ramos 823	MW173024	<i>Auricularia nigricans</i> (Sw.) Birkebak, Looney & Sánchez-García	-	-	-	-
Dorantes 06	MW173025	<i>Daldinia</i> sp.	-	-	-	-
Montoya 5471b	MW173026	<i>Clonostachys</i> sp.	+	+	+	+
Montoya 5472	MW173027	<i>Panus conchatus</i> (Bull.) Fr.	-	-	-	-

Ancho de la zona de inhibición del crecimiento (T): T= negativo (-) cuando los HF sobrepasan el HS; T= (+) cuando existe una barrera entre ambos hongos; T= (++) cuando es ≤ 2 mm; T= (+++) cuando es ≤ 5 mm y >2 mm; T= (++++) cuando es > 5 mm; ND= no determinado.

de inhibición. Sin embargo, considerando el ancho de la barrera de inhibición, presentó un efecto inhibitorio contra *Fusarium* muy inferior al de otras especies de macrohongos estudiadas, como *Marasmiellus diaphanus* (César 44) y *Gymnopus brunneiniger* (César 49), aunque solo inhibieron el desarrollo de *F. oxysporum* (CBF-185) (Figura 1). Las cepas de *Pseudomarasmius nidus-avis* (César 45) y *Lentinus crinitus* (César 16) presentaron el mayor rango de inhibición frente a las cepas fúngicas fitopatógenas utilizadas en el presente estudio, en comparación con el resto de los aislados obtenidos. Estas dos cepas (*P. nidus-avis* y *L. crinitus*) mostraron que hubo una diferencia en el comportamiento y tasa de crecimiento de los fitopatógenos: *Fusarium oxysporum* CBF-185, *F. oxysporum* ATCC-417, *Leptosphaerulina australis* y *Sclerotium cepivorum*, en presencia o ausencia de micelio de *P. nidus-avis* y *L. crinitus* durante nueve días (Figuras 1 y 2). En el ensayo dual, *Lentinus crinitus* (César 16) mostró un débil efecto de inhibición frente a *Sclerotium cepivorum* y *Leptosphaerulina australis*. Este resultado fue superior en el enfrentamiento dual contra las cepas ATCC-417 y CBF-185 de *Fusarium oxysporum* (Cuadro 2). Considerando la tasa de crecimiento intrínseco de cada HF, se observó un efecto inhibitorio más fuerte contra *S. cepivorum* seguido de *F. oxysporum* ATCC-417, *F. oxysporum* CBF-185 y *L. australis* (Figuras 1 y 2). Después de nueve días de incubación, los fitopatógenos no pudieron superar el micelio de *L. crinitus*.



**Figura 1.** Ensayos duales *in vitro* entre hongos silvestres aislados de bosque mesófilo contra hongos fitopatógenos de interés agrícola. CC45: *Pseudomarasmius nidus-avis*; La: *Leptosphaerulina australis*; Fo2: *Fusarium oxysporum* ATCC-417; Fo1: *F. oxysporum* CBF-185; Lc: *Lentinus crinitus*; S: *Sclerotium cepivorum*; CC44: *Marasmiellus diaphanus*; CC49: *Gymnopus brunneiniger*. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

En el caso de *Pseudomarasmius nidus-avis*, se registró un efecto significativo sobre la tasa de crecimiento de tres fitopatógenos. El mayor efecto se observó contra *Fusarium oxysporum* CBF-185, seguido de *F. oxysporum* ATCC-417 y *Leptosphaerulina australis*. Las confrontaciones se midieron durante nueve días, pero se observaron durante más de 15 días y los fitopatógenos no atravesaron la barrera del micelio de *P. nidus-avis*. Los resultados obtenidos con la cepa de *P. nidus-avis* son relevantes por el efecto antifúngico frente a *Fusarium oxysporum* y *Leptosphaerulina australis*, apoyando la observación

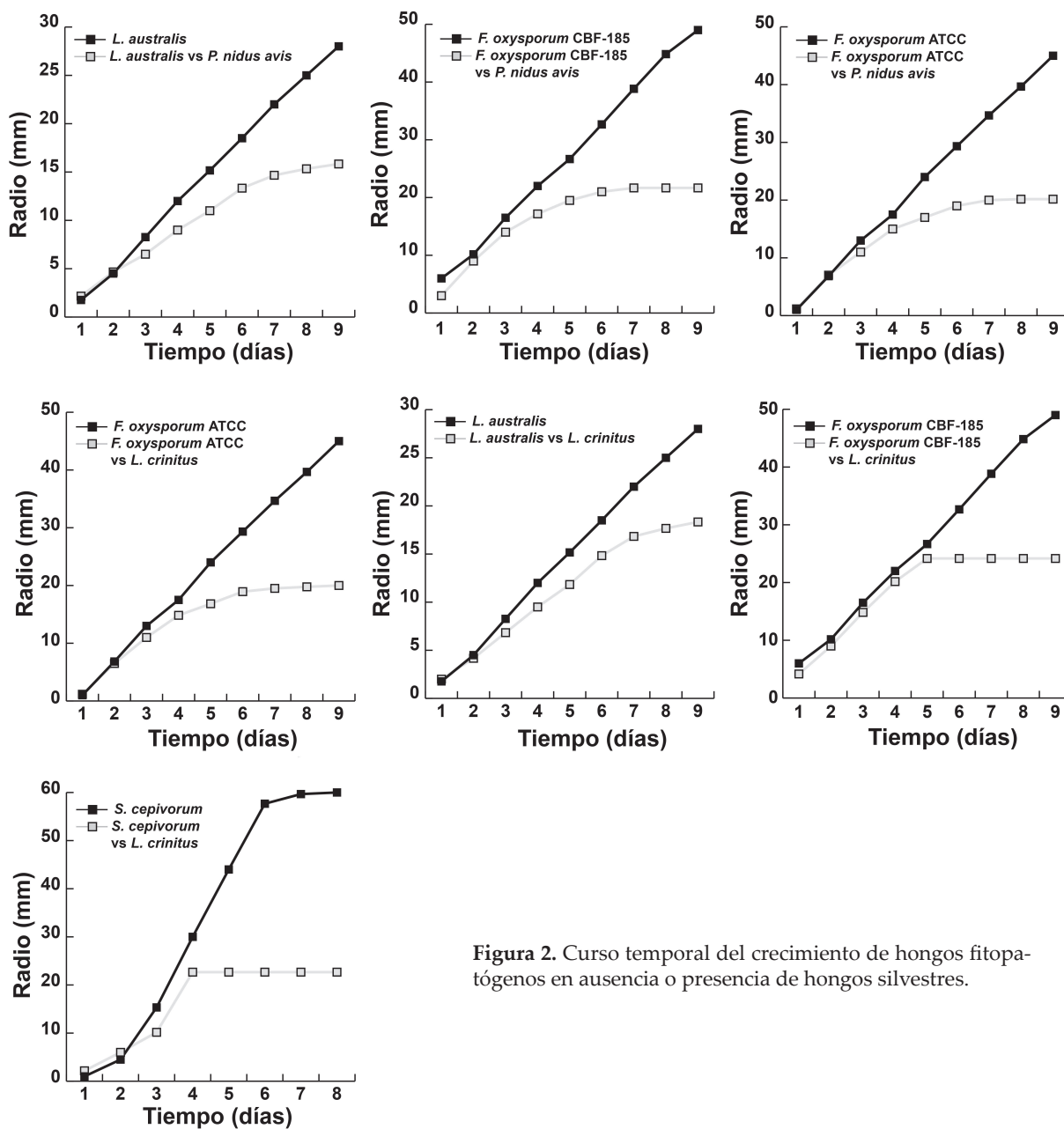


Figura 2. Curso temporal del crecimiento de hongos fitopatógenos en ausencia o presencia de hongos silvestres.

de César *et al.* (2018) sobre el probable comportamiento antagónico de los rizomorfos fúngicos de esta especie en los nidos de aves de la familia Tyrannidae. *Lentinus crinitus* y *Pseudomarasmius nidus-avis* mostraron un efecto contra tres y dos especies de HF, respectivamente. En el caso de *L. crinitus*, a pesar de tener un espectro amplio de actividad con las tres especies de HF (Cuadro 2), se muestra claramente que en ambas cepas de *F. oxysporum* (CBF-185 y ATCC-417) hay una mayor zona de

inhibición con respecto a las otras dos especies, por lo cual podría sugerirse que *L. crinitus* es un candidato para el control de *F. oxysporum*, con la posibilidad de actuar contra otros HF no específicos. Por ello, es necesario realizar una investigación minuciosa sobre los metabolitos de esta especie para determinar cuales están involucrados en la inhibición de los HF y su posible mecanismo de acción. Por otro lado, *Pseudomarasmius nidus-avis* tuvo el mismo efecto en la zona de inhibición para las dos especies de HF (*F. oxysporum* y *Leptosphaerulina australis*). Sin embargo, no tuvo ningún efecto sobre *Sclerotium cepivorum*, lo cual sugiere cierta especificidad y eficacia contra especies de HF que quizá compartan algunas características. Por ello, es necesario seguir indagando sobre las propiedades bioactivas de *P. nidus-avis* y hacer un análisis detallado del perfil metabólico para su uso en el control de HF.

#### **Producción del micelio en cultivo líquido**

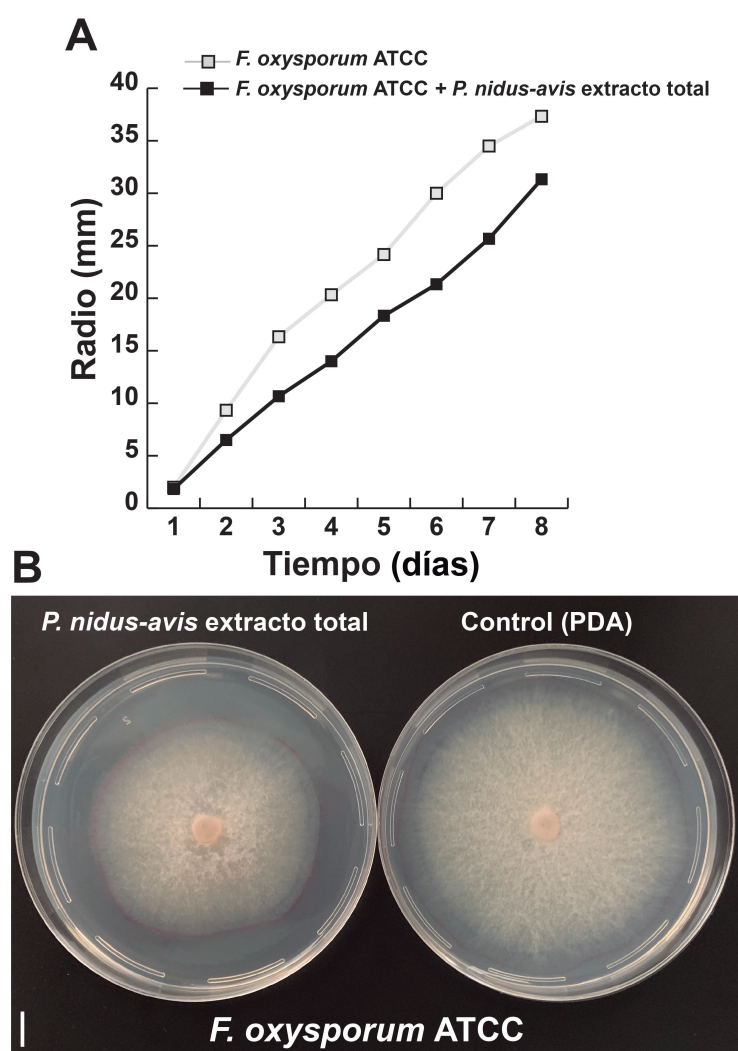
La biomasa obtenida de la cepa César 16 (*Lentinus crinitus*) se analizó en siete medios de cultivo líquidos diferentes, siendo el medio V8 al 30 % el de mayor rendimiento de micelio registrado. Además, la adición de un porcentaje de V8 a los otros medios contribuyó a aumentar la biomasa (Cuadro 1). Esto se observó claramente en el micelio de la cepa César 16, con un aumento de la biomasa >10 veces en el medio Melin-Norkrans modificado (Versión 2) con 10 % de jugo V8 (Campbells), con respecto al medio Melin-Norkrans (Versión 2). De la misma forma, hubo un ligero incremento en la biomasa del micelio cultivado en el medio modificado Pridham-Gottlieb con 10 % de jugo V8 en comparación con el medio Pridham-Gottlieb sin jugo V8. Con respecto al medio Melin-Norkrans (Versión 1 y 2) y el caldo de papa dextrosa, no hubo producción de micelio (biomasa) comparable con el medio de cultivo del jugo V8 al 30 % (Cuadro 1).

#### **Efecto del extracto crudo contra hongos fitopatógenos**

Para probar el efecto de los metabolitos presentes en los extractos crudos contra los HF, se produjeron mayores cantidades de biomasa sondeando en diferentes medios de cultivo líquido (Cuadro 1). De los 10 HS, se seleccionaron las cepas *L. crinitus* (César 16) y *P. nidus-avis* (César 45) por presentar los valores más altos en los enfrentamientos duales contra los HF. Debido a la escasez de biomasa de los diminutos cuerpos fructíferos de *P. nidus-avis*, solo se analizó el micelio aislado y el sobrenadante del cultivo. Los extractos metanólicos del cuerpo fructífero, el sobrenadante y el micelio de *Lentinus crinitus*, así como el micelio y el sobrenadante de *Pseudomarasmius nidus-avis*, se probaron frente a cuatro cepas de HF.

No hubo efecto de los extractos obtenidos del cuerpo fructífero, micelio y sobrenadante de *L. crinitus* sobre los HF. Esto podría deberse a que algunos metabolitos secundarios producidos por *L. crinitus* solo se expresan en presencia de competencia por el medio de cultivo, ya que existen reportes de algunas especies de *Lentinus* con efecto inhibitorio frente a fitopatógenos (Rojas-Ramírez, 2013; Vásquez *et al.*, 2018). Por otro lado, cabe señalar que existe la posibilidad de que la falta de efecto del extracto de *L. crinitus* sobre los HF también se deba al tipo de solvente utilizado, puesto que éste determina el tipo de metabolitos extraídos. Los ensayos de confrontación dual revelaron que

*L. crinitus* tiene actividad contra diversos HF, lo cual lo hace un candidato para ser utilizado en el control de diferentes enfermedades causadas por hongos. Sin embargo, es necesario determinar aquellos metabolitos que produce en presencia de otros hongos y cuáles son los que producen un efecto inhibitorio en los fitopatógenos. Por otro lado, el extracto metanólico del micelio de *P. nidus-avis* probado frente a los cuatro HF no tuvo efecto. Por el contrario, el extracto del sobrenadante de *P. nidus-avis* mostró un efecto de inhibición de 16.08 % contra *F. oxysporum* ATCC-417 (Figura 3A y



**Figura 3.** Curso temporal del crecimiento de *F. oxysporum* ATCC-417 en ausencia o presencia del extracto del sobrenadante de *Pseudomarasmius nidus-avis*. A: Inhibición del crecimiento de *F. oxysporum* ATCC-417 en presencia de 100  $\mu$ L del extracto crudo del sobrenadante de *P. nidus-avis*; B: Fotografías representativas del crecimiento de *F. oxysporum* ATCC-417 en presencia del extracto crudo del sobrenadante de *P. nidus-avis*.

3B). Este resultado es relevante ya que la cepa ATCC-417 de *F. oxysporum* es responsable del marchitamiento y muerte de las plantas que se caracteriza por secretar proteínas efectoras en el xilema, denominadas SIX (Secreted in Xylem), que contribuyen a su virulencia. La inhibición del crecimiento de *F. oxysporum* (ATCC-417) con el extracto metanólico del sobrenadante del cultivo de *P. nidus-avis* muestra un potencial interesante para el control biológico de este hongo que contiene nueve de los catorce genes SIX (Gamboa-Becerra *et al.*, 2021).

Se sabe que los hongos pueden modificar la producción de metabolitos secundarios dependiendo de varias características, como el medio en el que crecen, las condiciones de incubación, las fuentes y concentraciones de C:N y el solvente de extracción. El comportamiento competitivo y el daño también pueden afectar su perfil metabólico secundario (Bertrand *et al.*, 2014). Las diferencias observadas en este estudio entre el efecto de los enfrentamientos duales y de las extracciones con metanol podrían estar asociadas con algunas de estas condiciones mencionadas.

### CONCLUSIONES

Debido a los efectos nocivos de los plaguicidas sintéticos, es urgente encontrar nuevas alternativas de agentes de control de plagas de origen biológico y de bajo impacto ambiental. Los resultados actuales sugieren que las especies de HS del BMM tienen potencial para su aplicación en la agricultura. En especial *Pseudomarasmius nidus-avis*, un hongo endémico de Veracruz, el cual tiene gran potencial para ser utilizado en el control biológico de plagas causadas por microorganismos.

*P. nidus-avis* mostró un mayor efecto antifúngico contra *Leptosphaerulina australis* y dos cepas de *Fusarium oxysporum* que los otros hongos silvestres probados. Además, el extracto metanólico obtenido del sobrenadante de *P. nidus-avis* también tuvo un efecto inhibitorio sobre el desarrollo de la cepa ATCC-417, que al contener 9 genes SIX la convierte en una de las cepas más patógenas. Por lo tanto, sería de gran interés investigar el mecanismo de acción de *P. nidus-avis*, además de su espectro sobre otros fitopatógenos. Los ensayos y resultados actuales probaron la bioactividad de *P. nidus-avis*, lo que podría proporcionar alguna evidencia sobre las ventajas de la selección de esta especie de hongo en la interacción con aves de la familia Tyrannidae durante la anidación.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Roberto Gamboa-Becerra, M. Sc. Nut Liahut-Guin, M. Sc. Zelene Durán-Barradas por su apoyo en el aislamiento, caracterización micro y macroscópica y molecular de los hongos fitopatógenos y al Biol. David Ramos Rendón por la asistencia técnica. Esta investigación fue apoyada por las subvenciones CB 252431 para el estudio de especies tropicales de hongos en Veracruz, México, FORDECYT-PRONACES/CF 263959 y PDCPN 2015-882 de CONACyT-México.

### REFERENCIAS

Amin M, Tadele S, Selvaraj T. 2014. White rot (*Sclerotium cepivorum* Berk) an aggressive pest of onion and garlic in Ethiopia: An overview. Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development 6 (1): 6–15. <https://doi.org/10.5897/JABSD2013.0210>

- Anusiya G, Gowthama Prabu U, Yamini NV, Sivarajasekar N, Rambabu K, Bharath G, Banat F. 2021. A review of the therapeutic and biological effects of edible and wild mushrooms. *Bio-engineered* 12 (2): 11239–11268. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2001183>
- Aqueveque P, Céspedes CL, Alarcón J, Schmeda-Hirschmann G, Cañumir JA, Becerra J, Silva M, Sterner O, Radrigán R, Aranda M. 2016. Antifungal activities of extracts produced by liquid fermentations of Chilean *Stereum* species against *Botrytis cinerea* (grey mould agent). *Crop Protection* 89: 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.07.014>
- Aubrecht G, Huber W, Weissenhofer A. 2013. Coincidence or benefit? The use of *Marasmius* (horse-hair fungus) filaments in bird nests. *Avian Biology Research* 6 (1): 26–30. <https://doi.org/10.3184/175815512X13531739538638>
- Bandala VM, Montoya L, Ramos A. 2016. Two new *Lactarius* species from a subtropical cloud forest in eastern Mexico. *Mycologia* 108 (5): 967–980. <https://doi.org/10.3852/15-310>
- Bertrand S, Bohni N, Schnee S, Schumpp O, Gindro K, Wolfender JL. 2014. Metabolite induction via microorganism co-culture: a potential way to enhance chemical diversity for drug discovery. *Biotechnology Advances* 32 (6): 1180–1204. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.03.001>
- Castillo-Esparza JF, Bandala VM, Ramos A, Desgarenes D, Carrión G, César E, Montoya L, Ortiz-Castro R. 2021. *Pisolithus tinctorius* extract affects the root system architecture through compound production with auxin-like activity in *Arabidopsis thaliana*. *Rhizosphere* 19: 100397. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100397>
- César E, Bandala VM, Montoya L, Ramos A. 2018. A new *Gymnopus* species with rhizomorphs and its record as nesting material by birds (Tyrannidae) in the subtropical cloud forest from eastern Mexico. *MycKeys* 42: 21–34. <https://doi.org/10.3897/mycokeys.42.28894>
- Espinosa-García V, Mendoza G, Shnyreva AV, Padrón JM, Trigos A. 2021. Biological activities of different strains of the genus *Ganoderma* spp. (Agaricomycetes) from Mexico. *International Journal of Medicinal Mushrooms* 23 (2): 67–77. <https://doi.org/10.1615/intjmedmushrooms.2021037451>
- Finimundy TC, Dillon AJP, Henriques JAP, Ely MR. 2014. A review on general nutritional compounds and pharmacological properties of the *Lentinula edodes* mushroom. *Food and Nutrition Sciences* 5 (12): 1095–1105. <http://dx.doi.org/10.4236/fns.2014.512119>
- Flores W, Chico J, Cerna L. 2015. Actividad antagónica *in vitro* de *Clonostachys rosea* sobre *Fusarium oxysporum*, *Alternaria solani* y *Botrytis cinerea*. *Revista de Investigación Científica* 35 (1): 34–42.
- Gamboa-Becerra R, López-Lima D, Villain L, Breittler JC, Carrión G, Desgarenes D. 2021. Molecular and environmental triggering factors of pathogenicity of *Fusarium oxysporum* and *F. solani* isolates involved in the coffee corky-root disease. *Journal of Fungi* 7 (4): 253. <https://doi.org/10.3390/jof7040253>
- Gardes M, Bruns TD. 1993. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes application to the identification of mycorrhizae and rusts. *Molecular ecology* 2 (2): 113–118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.1993.tb00005.x>
- Kumar S, Kaushik N. 2013. Endophytic fungi isolated from oil-seed crop *Jatropha curcas* produces oil and exhibit antifungal activity. *PLoS ONE* 8 (2): e56202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056202>
- Largent D, Johnson D, Watling R. 1977. How to identify mushrooms to genus III: microscopic features. Mad River Press: Eureka, CA, USA. 148 p.
- Liu X, Trogisch S, He JS, Niklaus PA, Bruelheide H, Tang Z, Erfmeier A, Scherer-Lorenzen M, Pietsch KA, Yang B *et al.* 2018. Tree species richness increases ecosystem carbon storage in subtropical forests. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285 (1885): 20181240. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1240>
- Lodge DJ, Ammirati J, O’Dell TE, Mueller GM. 2004. Collecting and describing macrofungi. *In* *Biodiversity of fungi: inventory and monitoring methods*. Mueller G, Foster GM, Bills GF (eds.). Elsevier Academic Press: San Diego, CA, USA, pp: 128–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-509551-8.X5000-4>
- Luo ZP, Lin HY, Ding WB, He HL, Li YZ. 2015. Phylogenetic Diversity and Antifungal Activity of Endophytic Fungi Associated with *Tephrosia purpurea*. *Mycobiology* 43 (4): 435–443. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2015.43.4.435>

- Montoya L, Garay-Serrano E, Bandala VM. 2019. Two new species of *Phylloporus* (Fungi, Boletales) from tropical *Quercus* forests in eastern Mexico. *MycKeys* 51: 107–123. <https://doi.org/10.3897/mycokeys.51.33529>
- Moser M. 1983. Keys to agarics and boleti (Fourth edition). Mad River Press: Eureka, CA, USA. 535 p.
- Phookamsak R, Liu JK, Chukeatirote E, McKenzie EH, Hyde KD. 2013. Phylogeny and morphology of *Leptosphaerulina saccharicola* sp. nov. and *Pleosphaerulina oryzae* and relationships with *Pithomyces*. *Cryptogamie Mycologie* 34 (4): 303–319. <https://doi.org/10.7872/crym.v34.iss4.2013.303>
- Peay KG, Kennedy PG, Talbot JM. 2016. Dimensions of biodiversity in the Earth mycobiome. *Nature Reviews Microbiology* 14 (7): 434–447. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.59>
- Pegler DN. 1983. The genus *Lentinus*: a world monograph. Kew Publishing: London, UK. 281 p.
- Rojas-Ramírez L. 2013. Los basidiomicetos: una herramienta biotecnológica promisoría con impacto en la agricultura. *Fitosanidad* 17 (1): 49–55.
- Samuel P, Prince L, Prabakaran P. 2011. Antibacterial activity of marine derived fungi collected from South East Coast of Tamilnadu, India. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research* 1 (4): 86–94.
- Sandargo B, Chepkirui C, Cheng T, Chaverra-Muñoz L, Thongbai B, Stadler M, Hüttel S. 2019. Biological and chemical diversity go hand in hand: Basidiomycota as source of new pharmaceuticals and agrochemicals. *Biotechnology Advances* 37 (6): 107344. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.01.011>
- Suay I, Arenal F, Asensio FJ, Basilio A, Cabello MA, Díez MT, García JB, González del Val A, Gorrochategui J, Hernández P *et al.* 2000. Screening of basidiomycetes for antimicrobial activities. *Antonie van Leeuwenhoek* 78: 129–140. <https://doi.org/10.1023/A:1026552024021>
- Vásquez R, Rios N, Solano G, Cubilla-Rios L. 2018. Lentinoids A–D, new natural products isolated from *Lentinus strigellus*. *Molecules* 23 (4): 773. <https://doi.org/10.3390/molecules23040773>
- Yafetto L. 2018. The structure of mycelial cords and rhizomorphs of fungi: A mini-review. *Mycosphere* 9 (5): 984–998. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/9/5/3>

## SODIUM CHLORIDE AND SILICON AFFECT YIELD AND QUALITY OF TOMATO FRUITS

Víctor Hugo Carbajal-Vázquez<sup>1</sup>, Fernando Carlos Gómez-Merino<sup>1,2</sup>, Gabriel Alcántar-González<sup>1</sup>, José Andrés Herrera-Corredor<sup>2</sup>, Adriana Contreras-Oliva<sup>2</sup>, Libia Iris Trejo-Téllez<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56264.

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, Mexico. C. P. 94953.

\* Author for correspondence: tlibia@colpos.mx

### ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a glycophyte species with medium sensitivity to salts, tolerating electrical conductivity values in the soil solution of up to 2.5 dS m<sup>-1</sup>. Silicon (Si) is a beneficial element that can act as an inorganic biostimulant in plants subjected to salinity. In this research, the main effects of two study factors were evaluated: a) salinity by NaCl (0, 50, and 100 mM) in the nutrient solution and b) biostimulation by Si, applied to the leaves (0, 75, and 150 mg L<sup>-1</sup>), as well as the interaction of both factors on yield and quality in fruits of the second cluster of tomato plants cv. Río Supremo grown hydroponically under greenhouse conditions. Yield was significantly reduced in the saline treatments, and was not affected by the application of silicon. Compared with the control, the NaCl concentrations evaluated reduced the fruit pH value by 6.2 %, but increased titratable acidity (TA) by 64.8 %, electrical conductivity (EC) by 72.9 %, and total soluble solids (TSS) by 80 %. Consequently, the NaCl treatments increased the TSS/TA ratio, compared to the control. The application of 75 mg Si L<sup>-1</sup> through the leaves reduced the pH of the fruit by 0.6 %, while the dose of 150 mg Si L<sup>-1</sup> increased the EC and the TSS/TA ratio in fruits. In plants treated with 50 mM NaCl and with both doses of Si, an increase in fruit pH was recorded, while treatments with 100 mM NaCl with both doses of Si significantly reduced the TA values. The TSS/TA ratio increased with both doses of Si in the treatments with 100 mM NaCl. It is concluded that the combination of saline treatments with silicon can improve some quality attributes of tomato cv. Río Supremo fruits.

**Keywords:** *Solanum lycopersicum* L., beneficial element, salinity, pH, titratable acidity, electrical conductivity.

### INTRODUCTION

In Mexico, tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production is of great economic importance, as it is cultivated in 27 states of the federation. Sinaloa is the main Mexican state producer and exporter of this vegetable, and concentrates 21 % of the total national production, with a production volume of 677 612 Mg. The states of San Luis Potosí, Michoacán, and Jalisco follow in importance with productions of 440 876,

**Citation:** Carbajal-Vázquez VH, Gómez-Merino FC, Alcántar-González G, Herrera-Corredor JA, Contreras-Oliva A, Trejo-Téllez LI. 2023. Sodium chloride and silicon affect yield and quality of tomato fruits. *Agrociencia* 57(3): 536-563. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2967>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: January 20, 2023.

Approved: April 24, 2023.

**Published in Agrociencia:**  
May 10, 2023.

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



283 259, and 197 679 Mg, respectively. In 2021, Mexico advanced to ninth place as a tomato-producing country in the world, producing 3.3 million Mg, compared to 2015, the year it ranked tenth. This is because in the last ten years the average annual rate of production of this vegetable increased positively 1.8 % (SAGARPA, 2015; SIAP, 2021). In 2021, Mexico set a record in the export of red tomatoes, reaching a value of 829 million US dollars, which meant an increase of 5.1 % year-on-year (AMHPAC, 2021). However, tomato cultivation faces water supply problems for its production, and the level of salts in irrigation water has increased in recent years due to the effect of global climate change (Khamidov *et al.*, 2022).

The increase in salinity in irrigation water and cultivated land is a global phenomenon that is severely affecting agricultural production. It is estimated that in the world there are 831 million hectares with salinity problems (FAO, 2015). In Mexico, the northern and coastal states are the most affected by this stress factor. Salinization is a factor that most often occurs naturally, although it can also be caused by human activities. This phenomenon negatively affects the growth and development of crops, since the increase in the salt content in the root zone causes toxicity and imbalance of cations such as  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , and  $\text{K}^+$  (Mata-Fernández *et al.*, 2014; CONAGUA, 2018).

To counteract the effects of abiotic stress factors such as salinity, inorganic biostimulants such as silicon (Si) are currently being used. Silicon is the second most abundant element on earth, it represents 28.8 % concentration in the earth's crust; it forms part of the soil and rock particles, in combination with oxygen, and in silicate metals. Si is also found in the soil solution, as silicic acid ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ). The application of Si has shown beneficial effects in various crops, mainly cereals, which are characterized for their ability to store Si both in vacuoles and in the cell wall. Plant species of the Poaceae and Cyperaceae families register the highest Si content, with values greater than 4 % on a dry matter basis. Likewise, it has been reported that Si mitigates negative effects caused by abiotic stress factors such as drought and salinity in plants (Bauer *et al.*, 2011; Hernández-Apaolaza, 2014; Dehghanipoodeh *et al.*, 2015; Weber *et al.*, 2018; Trejo-Téllez *et al.*, 2022). The supply of Si in tomato plants under boron (B) stress improves the average weight of the fruit (Kaya *et al.*, 2011). In cucumber plants (*Cucumis sativus*), the application of Si generated significant increases in fruit yield and higher dry matter and total soluble solids contents (Jarosz, 2013). Under saline stress conditions, Si increased the firmness and intensity of the green color of cucumber fruits (González-Terán *et al.*, 2020). The objective of this study was to evaluate the effects of leaf application of Si to tomato plants exposed to salinity, on the individual yield of the first three clusters and their accumulated yield, as well as on quality variables of the second cluster of fruits.

## MATERIALS AND METHODS

### Experiment location and experimental conditions

The experiment was carried out in a tunnel-type greenhouse with a zenith window, plastic cover and anti-aphid mesh on the side walls, in Montecillo, State of Mexico, at

19.46° north latitude, 98.90° west longitude, and 2250 m altitude. During the research, the mean daytime and nighttime temperatures were 31.7 and 15.1 °C. The relative humidity during the day was 30 %, and 87 % during the night. The duration of the photoperiod was, on average, 11.3 h with a mean light intensity of 137  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

### **Plant material**

Hybrid cv. Río Supremo tomato seedlings were used, of determined growth, obtained from seed sowing in 200-cavity trays with peatmoss (Premier Horticulture Inc., ProMix FLX, Canada) as substrate. For the treatment test, a hydroponic system was established in a greenhouse, with seedlings, 32 days after sowing (das), with five true leaves. The hydroponic system was established in black polyethylene bags, caliber 400, 30 x 30 x 30 cm, using local volcanic gravel known as tezontle as inert substrate, with a particle size between 5 and 6 mm. The characteristics of this substrate have been previously reported (Trejo-Téllez *et al.*, 2013).

### **Treatment design of and experimental design**

To test the proposed treatments, a completely randomized experimental design was used in a 3<sup>2</sup> factorial arrangement. The first study factor was the concentration of sodium chloride (NaCl; Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA) added in the nutrient solution (NS) at three levels: 0, 50, and 100 mM, corresponding to electrical conductivities of 2, 7, and 12 dS m<sup>-1</sup> considering the composition of the NS. Steiner's universal solution was used (Steiner, 1984). The second study factor was the foliar application of Si, from SiO<sub>2</sub> (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA) at three levels: 0, 75, and 150 mg L<sup>-1</sup>. By combining the factors with the evaluated levels, nine treatments were obtained, each with nine replicates. The experimental unit consisted of a single plant 61 days after sowing, transplanted into a black polyethylene bag to support the plant material. The plants were staked with agricultural black raffia and axillary buds were pruned to bring them to a single stem.

The experimental units were placed in the greenhouse at a distance of 0.3 m between plants and 0.8 m between rows. The addition of NaCl concentrations to the nutrient solution started 61 das. Irrigation was carried out using a spaghetti drip system. For this, nine 200 L tanks were placed, each container had a 0.5 HP pump, a PVC branch with a return to the tank, regulated with a valve and with an outlet with a ring filter, which connected with the primary conduit (16 mm diameter black agricultural hose). This conduction line contained four crossheads that connected to four pipes, each ending in a stake. Five 1-min irrigations per day were carried out (from 07:00 to 19:00 h, every 3 h), with a volume of 100 mL per stake.

Foliar sprays with Si started 62 das. All the applications were made at 06:00 h, spraying the plants up to the point of dripping, with an average solution volume of 50 mL per plant. For greater adherence of the sprayed solution to the leaf blade, Tween® 20 surfactant (SigmaAldrich, St. Louis, MO, USA) was added at a concentration of 0.5 g L<sup>-1</sup>. A total of eight leaf applications were made at intervals of 10 days among applications. The pH of the sprayed solutions was adjusted to 4. The experiment lasted 80 days, that is, the plants reached 142 das.

### Evaluated variables

The individual yield of the first three clusters and their accumulated yield were evaluated, harvesting the fruits in the state of maturity known as red according to UPOV (2001). The quality variables were evaluated only in fruits of the second cluster with the degree of maturity described above.

In the fruit juice, obtained with an extractor (Hamilton Beach, 67606-MX, China), pH and electrical conductivity (EC) were determined using a portable meter (Conductronic PC18, Puebla, Mexico). Titratable acidity (TA) was also determined, using the methodology proposed by AOAC (1990), taking 5 mL of the juice that was brought to volume to 50 mL with deionized water. From this solution, a 10 mL aliquot was taken and titrated with 0.01 N NaOH. The percentage of acidity, based on citric acid, was calculated with the following formula:  $\text{citric acid (\%)} = \frac{[(\text{mL spent NaOH}) (\text{N NaOH}) (\text{meq of citric acid}) (\text{V}) (100)]}{[(\text{sample weight}) (\text{aliquot})]}$ ; where: N = normality of NaOH; meq = milliequivalents of the acid found in the highest proportion in the fruit, which is citric acid = 0.064; V = total volume.

Total soluble solids (TSS) were measured with a digital refractometer (ATAGO, PR-100 0-32; Tokyo, Japan), placing a drop of juice in the reading cell of the device. The relationship of TSS and TA was determined by dividing the TSS value by the TA value.

### Statistical analysis

With the results obtained, analyses of variance and comparison of means tests (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) were performed with the SAS software (SAS Institute, 2011).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Yield

The yield of the three clusters and the accumulated yield was significantly influenced by the NaCl factor; although not so by the Si factor. The interaction of the study factors NaCl  $\times$  Si had an influence on the yield of the third cluster (Table 1).

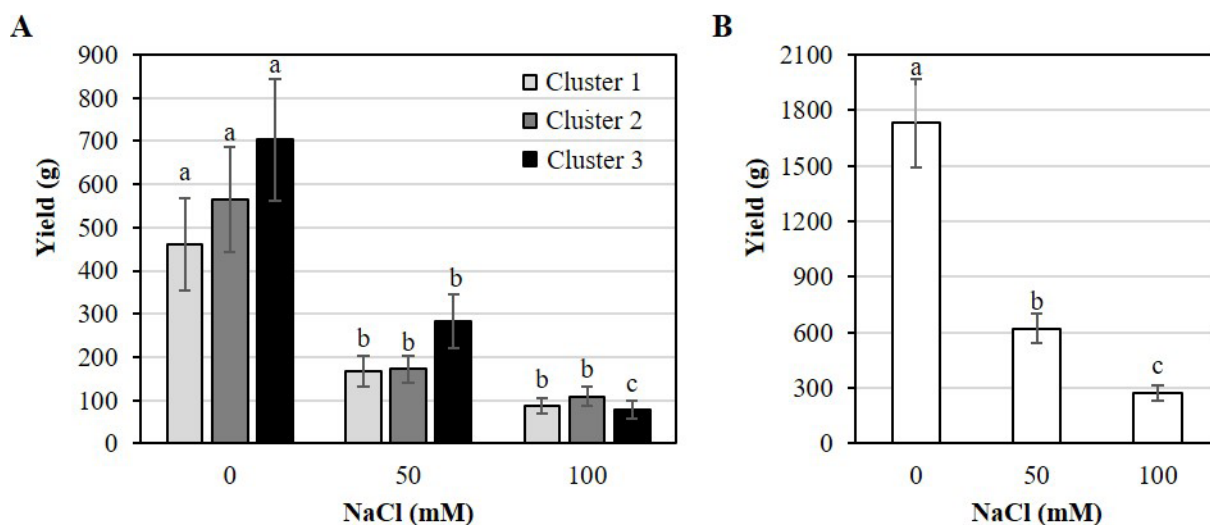
**Table 1.** Significance of the study factors NaCl, Si, and their interactions, on the yield of three clusters of fruits and accumulated yield in tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo plants.

Source of variation	Yield			
	First cluster	Second cluster	Third cluster	Three-clusters accumulated
NaCl	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *
Si	0.8265 ns	0.8105 ns	0.1185 ns	0.6609 ns
NaCl $\times$ Si	0.3527 ns	0.9226 ns	0.0002 *	0.6598 ns

\* = significant ( $p \leq 0.05$ ); ns = not significant ( $p > 0.05$ ).

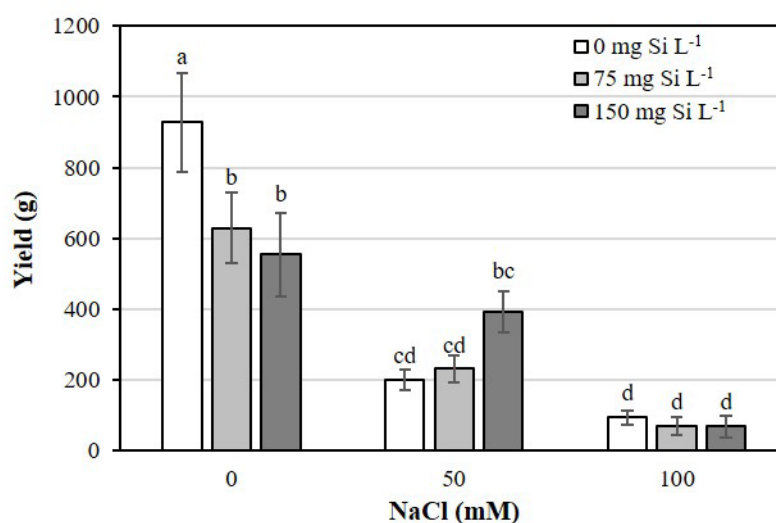
The absence of effect from Si on tomato yield observed in this study (Table 1) coincides with that reported in wheat (*Triticum aestivum*), a crop in which foliar applications of Si did not affect yield or grain quality in five cultivars analyzed (Segalin *et al.*, 2013).

**Significant effects of NaCl on performance.** Compared to the control, the applications of 50 and 100 mM NaCl decreased the yield of the first cluster by 63.8 and 81 %, respectively; the decreases in the second cluster were 70 and 80.7 %; while, in the third cluster, they were 60.9 and 88.8 %, respectively (Figure 1A). In the accumulated yield of the three clusters, the reduction was 64.6 and 84.1 % with the addition of 50 and 100 mM NaCl, respectively, compared to the control (Figure 1B). These results coincide with those obtained in a similar study, where four tomato races (Campeche, Oaxaca, Puebla, and Veracruz) and a commercial hybrid (Vengador) were treated with four salinity levels (0, 30, 60, and 90 mM NaCl), and resulted in that the yield per plant decreased for the four races and the hybrid with increasing salinity levels (Ladewig *et al.*, 2021). In watermelon (*Citrullus lanatus*), the application of saline solutions from 2.0 to 5.2 dS m<sup>-1</sup> decreased the average fruit weight and total yield (Colla *et al.*, 2006). In chili (*Capsicum annuum*), saline applications of 4 and 8 dS m<sup>-1</sup> decreased the fresh weight of the fruit (Grimaldo-Pantoja *et al.*, 2017). Lines of common bean (*Phaseolus vulgaris*) evaluated in saline soil with an EC value of 5.8 dS m<sup>-1</sup>, reduced the number of pods and grains per plant, which was attributed to the involvement of biochemical pathways in physiological processes, as well as to changes in the concentration and in the relationship of endogenous hormones that intervene in plant growth and development (López-Sánchez *et al.*, 2018).



**Figure 1.** Yield per cluster (A) and accumulated yield of three clusters (B) in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo treated with different concentrations of NaCl. Yield means per cluster and accumulated  $\pm$  SD with different letters indicate significant statistical differences (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

**Significant effects of the NaCl × Si interaction on yield.** The yield of the third cluster was reduced due to the interaction of the study factors (Figure 2). In the absence of salt, Si reduced yield. In the rest of the salinity levels, there were no differences among treatments from the addition of Si (Figure 2). Several studies show the beneficial influence of Si on the yield of tomato plants when they are subjected to some type of stress (Toresano-Sánchez *et al.*, 2012; Jarosz, 2014). In our study, the addition of 150 mg Si L<sup>-1</sup> in plants exposed to 50 mM NaCl tended to increase this parameter, although the differences were not significant.



**Figure 2.** Yield of the third cluster of tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo plants treated with different concentrations of NaCl and Si. Means ± SD with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

### Fruit quality

The NaCl factor and its interaction with Si had significant effects on all the fruit quality parameters evaluated. As an individual factor, the leaf application of Si only affected the values of pH, EC and TSS/TA ratio (Table 2).

**Table 2.** Significance of the study factors NaCl, Si, and their interactions, on the chemical properties of fruit quality evaluated in tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo.

Source of variation	pH	EC	TSS	TA	TSS/TA
NaCl	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *
Si	0.0017 *	0.0001 *	0.8497 ns	0.2828 ns	0.0344 *
NaCl × Si	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *

\* = significant ( $p \leq 0.05$ ); ns = not significant ( $p > 0.05$ ). EC: electrical conductivity; TSS: total soluble solids; TA: titratable acidity.

**Significant effects of NaCl on fruit quality.** Some tomato fruit quality indicators are positively affected when plants are exposed to saline stress (Zhang *et al.*, 2016). In this study, the pH of the fruit was reduced with the salinity doses evaluated (Table 3). Tomato fruits produced for the industry must have a value of pH of 4.4 to inactivate pathogenic microorganisms (Villegas-Espinoza *et al.*, 2018). In our study, the pH values of the fruits were lower than those reported, which is indicative of higher quality and possible longer shelf life.

**Table 3.** Main effect of the NaCl study factor on the chemical properties of fruit quality evaluated in tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo.

NaCl (mM)	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	TSS (°Brix)	TA (% citric acid)	TSS/TA ratio
0	4.17 ± 0.015 a	5.12 ± 0.078 b	4.99 ± 0.069 c	0.44 ± 0.027 b	11.65 ± 0.420 b
50	4.05 ± 0.032 b	8.91 ± 0.593 a	9.17 ± 0.411 a	0.72 ± 0.045 a	13.05 ± 0.285 a
100	4.03 ± 0.018 b	8.80 ± 0.570 a	8.81 ± 0.482 b	0.73 ± 0.082 a	12.52 ± 0.695 a

Means ± SD with different letters in each column indicate statistical differences among treatments (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). EC: electrical conductivity; TSS: total soluble solids; AT: titratable acidity.

The applications of 50 and 100 mM NaCl increased the EC of the juice by 74 and 71.9 % with respect to the control. There were also increases of 83.8 and 76.6 % in the TSS, with respect to the control. The addition of NaCl to the nutrient solution also increased the TSS/TA ratio on average by 9.7 %, with respect to the control (Table 3). These results are consistent with what has been reported by other investigations (Li *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2014; Zushi and Matsuzoe, 2015; Zhang *et al.*, 2016; Villegas-Espinoza *et al.*, 2018). As a consequence of the high concentration of salts in the roots (osmotic effect), the flow of water to the aboveground parts is inhibited and the concentration of carbohydrates (total soluble solids) is increased, in order to reduce the oxidative stress caused by the lack of water in cells (Zahra *et al.*, 2011). Moderate salinity promotes the activity of the enzyme sucrose invertase that allows the release of hexoses during ripening, which results in a greater accumulation of sugars in the fruit (Lu *et al.*, 2012; Moles *et al.*, 2019). Due to reduced water transport caused by salinity, plants increase the production of organic acids (oxaloacetic and  $\alpha$ -ketoglutaric), in order to synthesize amino acids such as glutamate, asparagine,  $\gamma$ -aminobutyric (GABA) and proline, which carry out an antioxidant and osmoprotective function (Sato *et al.*, 2006). Applications of NaCl increased the acidity of tomato juice by an average of 64.8 %, compared to the control (Table 3). Increased acidity is a common response to salinity, since it promotes the activity of the Krebs cycle (Zushi and Matsuzoe, 2015).

**Significant effects of Si on fruit quality.** Fruit quality is critically affected by pH, since it can inactivate spoilage pathogens and decrease the respiration rate, which prolongs the shelf life of the fruit (Turhan *et al.*, 2011; Tigist *et al.*, 2013). The leaf application of

75 mg Si L<sup>-1</sup> significantly decreased the pH of the fruit juice by 0.6 %, compared to the control (Table 4). The pH range obtained in our study oscillated between 4.08 and 4.10, lower values than those reported in tomato by various authors: 4.12-4.35 (Turhan *et al.*, 2011), 4.21-4.80 (Giannakoula and Ilias, 2013), and 4.09-4.21 (Korkmaz *et al.*, 2018). In chili, the treatment with Si causes fruit pH ranges from 5.53 to 5.70 (Jayawardana *et al.*, 2014) and in cucumber from 5.21 to 5.23 (González-Terán *et al.*, 2020). Similarly, the 150 mg Si L<sup>-1</sup> dose decreased the electrical conductivity of the fruit by 6.1 %, compared to the control (Table 4). This trend was also observed in aloe vera (*Aloe barbadensis*) (Xu *et al.*, 2015) and in cucumber (González-Terán *et al.*, 2020).

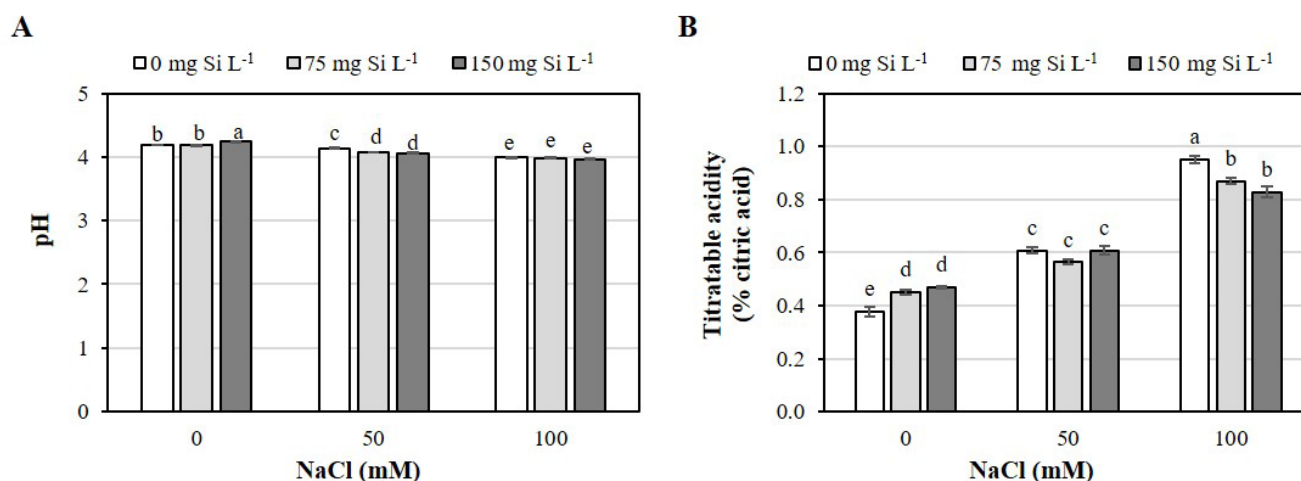
**Table 4.** Main effect of the study factor Si on the chemical properties of fruit quality evaluated in tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo.

Si (mg L <sup>-1</sup> )	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	TSS/TA ratio
0	4.10 ± 0.044 a	7.6 ± 1.096 a	12.03 ± 0.609 b
75	4.08 ± 0.042 b	7.6 ± 1.040 a	12.17 ± 0.389 ab
150	4.09 ± 0.059 ab	7.1 ± 1.223 b	12.55 ± 0.330 a

Means ± SD with different letters in each column indicate statistical differences among treatments (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). EC = electrical conductivity; TSS = total soluble solids; TA = titratable acidity.

The addition of Si to plants under salt stress adjusts the osmotic potential of the cells through a greater accumulation of osmolytes such as inorganic ions, soluble sugars, and proline (Coskun *et al.*, 2016). The leaf application of 150 mg L<sup>-1</sup> Si increased the TSS/TA ratio by 4.3 %, with respect to the control (Table 4). Similar effects were found in tomato (Stamatakis *et al.*, 2003; Iglesias *et al.*, 2015) and strawberry (*Fragaria × ananassa*) (Weber *et al.*, 2018). On the contrary, in four varieties of mango (*Mangifera indica*), the application of 1.5 mM Si significantly increased the TA of the fruits, but did not affect the TSS content (Helaly *et al.*, 2017). Meanwhile, the application of 50 and 100 mg Si L<sup>-1</sup> to seedlings of two tomato varieties caused significant reductions in the TSS and TA values (Weerahewa and David, 2015). In cherry tomato cv. Unicorn fruits treated with 20 mM Si, a decrease in TSS and an increase in TA were observed (Islam *et al.*, 2018).

**Significant effects of the NaCl × Si interaction on fruit quality.** The effects of the interaction of the study factors NaCl and Si show significant trends in the evaluated fruit quality parameters (Figures 3 and 4). On the one hand, the higher Si dose evaluated increases the pH of fruits of plants without salinity stress by 1.3 % compared to the treatment without Si and without salinity (Figure 3A). However, in the absence of salinity, the titratable acidity increased significantly with the treatments with 75 and 150 mg Si L<sup>-1</sup> (Figure 3B). This effect was similar to that reported by Baninaiem *et al.* (2016), when applying 1 to 4 mM Si in tomato cv. Baraka. In our study, the titratable



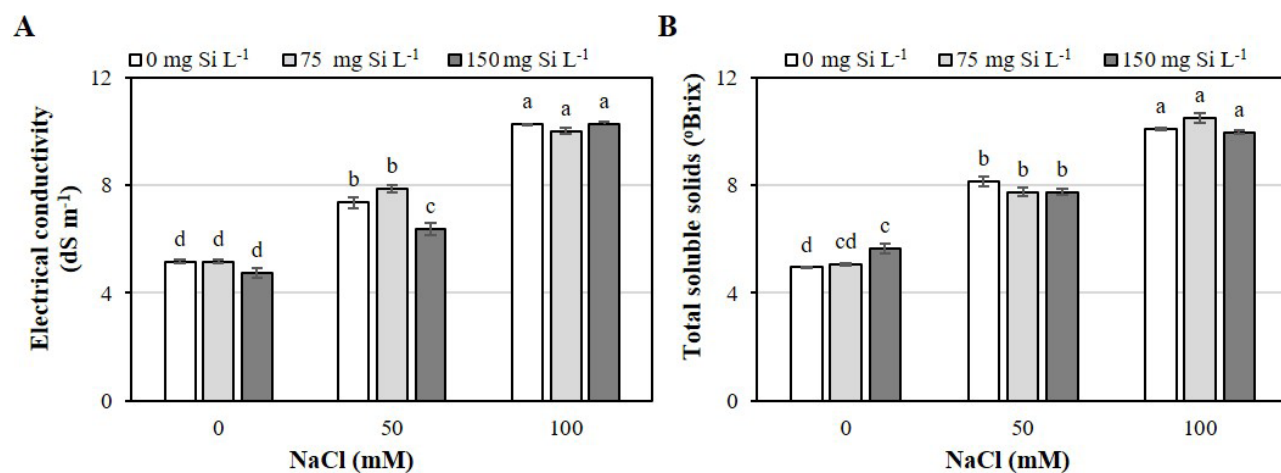
**Figure 3.** Effects of the interaction of the study factors (NaCl × Si) on the pH value (A) and titratable acidity (B) in tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo. Means ± SD with different letters in each subfigure indicate statistical differences among treatments (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

acidity was significantly reduced in plants treated with 100 mM NaCl, in the presence of 75 and 100 mg L<sup>-1</sup> Si (Figure 3B). An opposite effect was reported in tomato plants irrigated with saline water (12 dS m<sup>-1</sup>) when applying up to 400 ppm K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, which increased TA values (Elkhatib *et al.*, 2017).

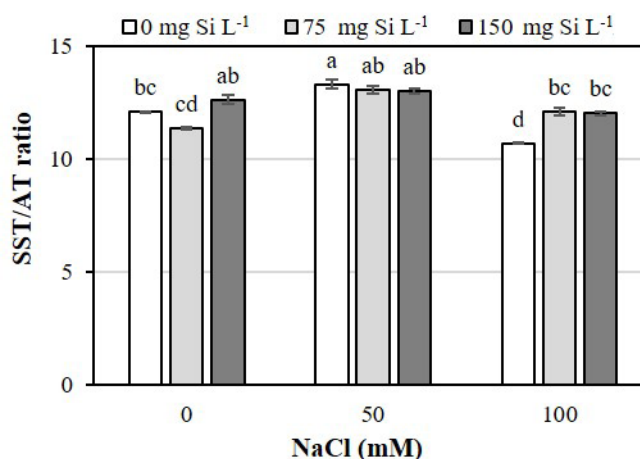
In the present study, plants treated with 50 mM NaCl and sprayed with 75 or 150 mg L<sup>-1</sup> produced fruits with pH values 1.6 % lower than those observed in the fruits of plants exposed to 50 mM NaCl without Si (Figure 3A).

In plants treated with 150 mg Si L<sup>-1</sup> and 50 mM NaCl, the electrical conductivity of the fruits was reduced by 13.4 %, compared to the treatment without Si and with 50 mM NaCl (Figure 4A). Likewise, in the absence of salinity, leaf treatment with 150 mg Si L<sup>-1</sup> increased TSS concentration in fruits by 14.1 % (Figure 4B). This effect was also observed by Jarosz (2013) in cucumber cv. Unicum grown in substrate (peat-sand) when adding 750 mg Si L<sup>-1</sup> in the nutrient solution. The TSS were not influenced by the addition of Si with the levels of 50 and 100 mM NaCl (Figure 4B), which agrees with the reports by Korkmaz *et al.* (2018) and Costan *et al.* (2019) in tomato, and those of Tabatabaei (2016) in strawberry.

The TSS/TA ratio is an indicator of sensory quality (taste) in fruit (Mikulic-Petkovsek *et al.*, 2012; Weber *et al.*, 2018). In this study, both levels of Si (75 and 150 mg Si L<sup>-1</sup>) in combination with high salinity (100 mM NaCl) increase the value of the TSS/TA ratio by an average of 12.8 % compared to the control treatment without NaCl and without Si (Figure 5). This may be due to the fact that salinity reduces the amount of water in the fruit and Si limits the portion of water that passes through the root via apoplastic pathway, which reduces the entry of Na<sup>+</sup> (Stamatakis *et al.*, 2003; Wasti *et al.*, 2017), and generates a greater accumulation of TSS in the fruit (Qin *et al.*, 2016).



**Figure 4.** Effects of the interaction of the study factors (NaCl × Si) on electrical conductivity (A) and total soluble solids (B) in tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo. Means ± SD with different letters in each subfigure indicate statistical differences among treatments (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).



**Figure 5.** Effects of the interaction of the study factors (NaCl × Si) on electrical conductivity (A) and total soluble solids (B) in tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo. Means ± SD with different letters indicate statistical differences among treatments (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

## CONCLUSIONS

As individual factors, sodium chloride (NaCl) reduced tomato fruit yield, but silicon (Si) did not affect this parameter. The interaction of both factors decreased yield only in the third cluster evaluated. The quality variables were differentially affected by the NaCl levels tested, with beneficial effects on electrical conductivity and concentration

of total soluble solids. Foliar Si applications increased the TSS/TA ratio. The interaction of the factors showed that the effects of foliar Si applications are dependent on saline treatments. It is concluded that, under salinity conditions, the application of Si improves tomato quality attributes, at the expense of yield.

## REFERENCES

- AMHPAC (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A. C). 2021. México va en el 2021 por nuevo récord en exportación de tomates. Comunicado de prensa publicado por el periódico El Economista el 22 de junio de 2021. Culiacán, Sinaloa, México. <https://www.amhpac.org/es/index.php/en/informacion/noticias/17-noticias/708-mexico-va-en-el-2021-por-nuevo-record-en-exportacion-de-tomates> (Retrieved: May 2023)
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 1990. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Helrich K. (ed.). AOAC: Arlington, VA, USA. 1298 p.
- Baninaiem E, Mirzaaliandastjerdi AM, Rastegar S, Abbaszade KH. 2016. Effect of pre-and postharvest salicylic acid treatment on quality characteristics of tomato during cold storage. *Advances in Horticultural Science* 30 (3): 183–192. <https://doi.org/10.13128/ahs-20281>
- Bauer P, Elbaum R, Weiss IM. 2011. Calcium and silicon mineralization in land plants: transport, structure and function. *Plant Science* 180 (6): 746–756. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.01.019>
- Colla G, Roupahel Y, Cardarelli M, Rea E. 2006. Effect of salinity on yield, fruit quality, leaf gas exchange, and mineral composition of grafted watermelon plants. *HortScience* 41 (3): 622–627. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.3.622>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Estadísticas del agua en México. México-Gobierno de la República. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México. [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf) (Retrieved: August 2022)
- Coskun D, Britto DT, Huynh WQ, Kronzucker HJ. 2016. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in Plant Science* 7 (1072): 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01072>
- Costan A, Stamatakis A, Chrysargyris, Petropoulos SA, Tzortzakis N. 2019. 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>
- Dehghanipoodeh S, Ghobadi C, Baninasab B, Gheysari M, Bidabadi SS. 2015. Effects of potassium silicate and nanosilica on quantitative and qualitative characteristics of a commercial strawberry (*Fragaria × ananassa* cv. Camarosa). *Journal of Plant Nutrition* 39 (4): 502–507. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1086789>
- Elkhatib AH, Gabr MS, Roshdy HA, Al-Haleem AM. 2017. The impacts of silicon and salicylic acid amendments on yield and fruit quality of salinity stressed tomato plants. *Alexandria Science Exchange Journal* 38 (4): 933–939. <https://doi.org/10.21608/ASEJAIQJSAE.2017.4857>
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 2015. Status of the world's soil resources. FAO, Rome.
- Giannakoula AE, Ilias IF. 2013. The effect of water stress and salinity on growth and physiology of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Archives of Biological Sciences* 65 (2): 611–620. <https://doi.org/10.2298/ABS1302611G>
- González-Terán G, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI. 2020. Effects of silicon and calcium on growth, yield and fruit quality parameters of cucumber established in a sodic soil. *Acta Scientiarum Poloniarum. Hortorum Cultus* 19 (3): 149–158. <https://doi.org/10.24326/asphc.2020.3.13>
- Grimaldo-Pantoja GL, Niu G, Sun Y, Castro-Rocha A, Álvarez-Parrilla E, Flores-Márgez JP, Corral-Díaz B, Osuna-Ávila P. 2017. Efecto negativo del riego salino en componentes del rendimiento y fitoquímicos de chile (*Capsicum annuum*) inoculado con hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40 (2): 141–149.

- Helaly MN, El-Hoseiny H, El-Sheery NI, Rastogi A, Kalaji HM. 2017. Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant Physiology and Biochemistry* 118: 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.021>
- Hernández-Apaolaza L. 2014. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. *Planta* 240 (1): 447–458. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>
- Iglesias MJ, García-López J, Collados-Luján JF, López-Ortiz F, Díaz M, Toresano F, Camacho F. 2015. Differential response to environmental and nutritional factors of high-quality tomato varieties. *Food Chemistry* 176: 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.043>
- Islam MZ, Mele MA, Choi KY, Kang HM. 2018. The effect of silicon and boron foliar application on the quality and shelf life of cherry tomatoes. *Zemdirbyste Agriculture* 105 (2): 159–164. <https://doi.org/10.13080/z-a.2018.105.020>
- Jarosz Z. 2013. The effect of silicon application and type of substrate on yield and chemical composition of leaves and fruit of cucumber. *Journal of Elementology* 18 (3): 403–414. <https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.3.05>
- Jarosz Z. 2014. The effect of silicon application and type of medium on yielding and chemical composition of tomato. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus* 13 (4): 171–183.
- Jayawardana HARK, Weerahewa HLD, Saparamadu MDJS. 2014. Effect of root or foliar application of soluble silicon on plant growth, fruit quality and anthracnose development of *Capsicum*. *Tropical Agricultural Research* 26 (1): 74–81.
- Kaya C, Levent TA, Guneri M, Ashraf M. 2011. Mitigation effects of silicon on tomato plants bearing fruit grown at high boron levels. *Journal of Plant Nutrition* 34 (13): 1985–1994. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.610485>
- Khamidov M, Ishchanov J, Hamidov A, Donmez C, Djumaboev K. 2022. Assessment of soil salinity changes under the climate change in the Khorezm Region, Uzbekistan. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (14): 8794. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148794>
- Korkmaz A., Karagöl A, Akinoğlu G, Korkmaz H. 2018. The effects of silicon on nutrient levels and yields of tomatoes under saline stress in artificial medium culture. *Journal of Plant Nutrition* 41 (1): 123–135. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1381975>
- Ladewig P, Trejo-Téllez LI, Servín-Juárez R, Contreras-Oliva A, Gómez-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): 1–15. <https://doi.org/10.15835/nbha49112005>
- Li YL, Stanghellini C, Challa H. 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Scientia Horticulturae* 88 (1): 11–29. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(00\)00190-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(00)00190-4)
- Liu FY, Li KT, Yang WJ. 2014. Differential responses to short-term salinity stress of heat-tolerant cherry tomato cultivars grown at high temperatures. *Horticulture, Environment and Biotechnology* 55 (2): 79–90. <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0127-1>
- López-Sánchez RC, Gómez-Padilla E, Campos-Posada R, Eichler-Löbermann B, Rodríguez-Larramendi LA, Guevara-Hernández F, Gongora-Mora G. 2018. Afectaciones en el rendimiento de líneas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) provocado por salinidad. *Cultivos Tropicales* 39 (1): 74–80.
- Lu SW, Qi F, Li TL. 2012. Effects of salt stress on sugar content and sucrose metabolism in tomato fruit. *China Vegetables* 1 (20): 56–61.
- Mata-Fernández I, Rodríguez-Gamiño, ML, López-Blanco J, Vela-Correa G. 2014. Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente* 1 (5): 26–35.
- Mikulic-Petkovsek M., Schmitzer V, Slatnar A, Stampar F, Veberic R. 2012. Composition of sugars, organic acids, and total phenolics in 25 wild or cultivated berry species. *Journal of Food Science* 77 (10): C1064–C1070. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02896.x>
- Moles TM, de Brito-Francisco R, Mariotti L, Pompeiano A, Lupini A, Incrocci L, Carmassi G, Scartazza A, Pistelli L, Guglielminetti L, Pardossi A, Sunseri F, Hörtensteiner S, Santelia D. 2019. Salinity in autumn-winter season and fruit quality of tomato landraces. *Frontiers in Plant Science* 10 (1078): 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01078>

- Qin L, Kang WH, Qi YL, Zhang ZW, Wang N. 2016. The influence of silicon application on growth and photosynthesis response of salt stressed grapevines (*Vitis vinifera* L.). *Acta Physiologiae Plantarum* 38 (68): 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2087-9>
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2015. Se consolida México como primer exportador mundial de tomate. Boletín de prensa. <http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/Paginas/2015B466.aspx> (Retrieved: July 2022).
- SAS Institute. 2011. Base SAS® 9.3 Procedures Guide: Statistical Procedures. Cary, NC, USA. 536 p.
- Sato S, Sakaguchi S, Furukawa H, Ikeda H. 2006. Effects of NaCl application to hydroponic nutrient solution on fruit characteristics of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae* 109 (3): 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.05.003>
- Segalin SR, Huth C, Rosa TDA, Pahins DB, Mertz LM, Nunes UR, Martín TN. 2013. Foliar application of silicon and the effect on wheat seed yield and quality. *Journal of Seed Science* 35 (1): 86–91.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2022. Panorama agroalimentario 2022. <https://drive.google.com/file/d/1jVWS4EFKK7HGwQOBpGeljUyaDT8X8Iyz/view> (Retrieved: April 2023).
- Stamatakis A, Papadantonakis N, Savvas D, Lydakakis-Simantiris N, Kefalas P. 2003. Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. *Acta Horticulturae* 609 (18): 141–147. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.609.18>
- Steiner A. 1984. The universal nutrient solution. In *Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture*. Secretariat of ISOSC (ed.). Luneren 29 April–5 May. International Society of Soilless Culture: Wageningen, Netherlands, pp: 633–649.
- Tabatabaei SJ. 2016. Interactive effects of Si and NaCl on growth, yield, photosynthesis, and ions content in strawberry (*Fragaria × ananassa* var. Camarosa). *Journal of Plant Nutrition* 39 (11): 1524–1535. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1161771>
- Tigist M, Workneh TS, Woldetsadik K. 2013. Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. *Journal of Food Science and Technology* 50 (3): 477–486. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0378-0>
- Toresano-Sánchez F, Valverde-García A, Camacho-Ferre F. 2012. Effect of the application of silicon hydroxide on yield and quality of cherry tomato. *Journal of Plant Nutrition* 35 (4): 567–590. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.644375>
- Trejo-Téllez LI, Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC, García-Albarado JC, Baca-Castillo GA, Tejeda-Sartorius O. 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2013 (5): 863–876.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Trejo LF, Escobar-Sepúlveda HF, Gómez-Merino GM. 2022. The genetics of silicon accumulation in plants. In *Etessami H, Al-Saeedi AH, El-Ramady H, Fujita M, Pessarakli M, Hossain MA (eds.), Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement*. Elsevier-Academic Press: Amsterdam, Netherlands, pp: 67–75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00011-X>
- Turhan A, Ozmen N, Serbeci MS, Seniz V. 2011. Effects of grafting on different rootstocks on tomato fruit yield and quality. *Horticultural Science* 38 (4): 142–149.
- UPOV (Union for the Protection of New Varieties of Plants). 2001. Guidelines for the conduct of test for distinctness, uniformity and stability: tomato. [http://www.upov.int/en/publications/tg-rom/tg044/tg\\_44\\_10.pdf](http://www.upov.int/en/publications/tg-rom/tg044/tg_44_10.pdf) (Retrieved: July 2022).
- Villegas-Espinoza JA, Reyes-Pérez JJ, Nieto-Garibay A, Ruiz-Espinoza FH, Cruz-Falcón A, Murillo-Amador B. 2018. Bioestimulante Liplant®: su efecto en *Solanum lycopersicum* (L.) cultivado en suelos ligeramente salinos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9 (20): 4137–4147. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.985>
- Wasti S, Manaa A, Mimouni H, Nsairi A, Ibtissem M, Gharbi E, Gautier H, Ahmed HB. 2017. Exogenous application of calcium silicate improves salt tolerance in two contrasting tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivars. *Journal of Plant Nutrition* 40 (5): 673–684. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1250908>
- Weber N, Schmitzer V, Jakopic J, Stampar F. 2018. First fruit in season: seaweed extract and silicon advance organic strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) fruit formation and yield. *Scientia Horticulturae* 242: 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.07.038>

- Weerahewa HLD, David D. 2015. Effect of silicon and potassium on tomato anthracnose and on the postharvest quality of tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka 43 (3): 273–280. <http://doi.org/10.4038/jnsfsr.v43i3.7959>
- Xu CX, Ma YP, Liu YL. 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. South African Journal of Botany 98: 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.008>
- Zahra S, Amin B, Ali VSM, Ali Y, Mehdi Y. 2011. The salicylic acid effect on the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) sugar, protein and proline contents under salinity stress (NaCl). Journal of Biophysics and Structural Biology 2 (3): 35–41.
- Zhang P, Senge M, Dai Y. 2016. Effects of salinity stress on growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under hydroponics system. Reviews in Agricultural Science 4 (1): 46–55. <https://doi.org/10.7831/ras.4.46>
- Zushi K, Matsuzoe N. 2015. Metabolic profile of organoleptic and health-promoting qualities in two tomato cultivars subjected to salt stress and their interactions using correlation network analysis. Scientia Horticulturae 184: 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.030>

## CLORURO DE SODIO Y SILICIO AFECTAN RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRUTOS DE TOMATE

Víctor Hugo Carbajal-Vázquez<sup>1</sup>, Fernando Carlos Gómez-Merino<sup>1,2</sup>, Gabriel Alcántar-González<sup>1</sup>, José Andrés Herrera-Corredor<sup>2</sup>, Adriana Contreras-Oliva<sup>2</sup>, Libia Iris Trejo-Téllez<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264.

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

\* Autor para correspondencia: tlibia@colpos.mx

### RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en una especie glicófita con sensibilidad media a sales, que tolera valores de conductividad eléctrica en la solución del suelo de hasta 2.5 dS m<sup>-1</sup>. El silicio (Si) es un elemento benéfico que puede actuar como bioestimulante inorgánico en plantas sometidas a salinidad. En esta investigación se evaluaron los efectos principales de dos factores de estudio: a) salinidad por NaCl (0, 50 y 100 mM) en la solución nutritiva y b) bioestimulación por Si, aplicado vía foliar (0, 75 y 150 mg L<sup>-1</sup>), así como la interacción de ambos factores en rendimiento y calidad en frutos del segundo racimo de plantas de tomate cv. Río Supremo cultivado en hidroponía en invernadero. El rendimiento se redujo significativamente en los tratamientos salinos, y no fue afectado por la aplicación de silicio. En comparación con el testigo, las concentraciones de NaCl evaluadas redujeron el valor del pH de fruto en 6.2 %, pero aumentaron acidez titulable (AT) en 64.8 %, conductividad eléctrica (CE) en 72.9 % y sólidos solubles totales (SST) en 80 %. En consecuencia, los tratamientos de NaCl incrementaron la relación SST/AT, respecto al testigo. La aplicación de 75 mg Si L<sup>-1</sup> vía foliar redujo en 0.6 % el pH del fruto; mientras que, la dosis de 150 mg Si L<sup>-1</sup> incrementó la CE y la relación SST/AT en frutos. En plantas tratadas con 50 mM NaCl y con ambas dosis de Si se registró aumento en el pH del fruto, mientras que tratamientos con 100 mM NaCl con ambas dosis de Si, redujeron significativamente los valores de AT. La relación SST/AT aumentó con ambas dosis de Si en los tratamientos con 100 mM NaCl. Se concluye que la combinación de tratamientos salinos con silicio puede mejorar algunos atributos de calidad de frutos de tomate cv. Río Supremo.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicum* L., elemento benéfico, salinidad, pH, acidez titulable, conductividad eléctrica.

### INTRODUCCIÓN

En México, la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es de gran importancia económica, pues se cultiva en 27 estados de la federación. Sinaloa es el principal estado mexicano productor y exportador de esta hortaliza, y concentra el 21 % de la producción nacional total, con un volumen de producción de 677 612 Mg. Le siguen

**Citation:** Carbajal-Vázquez VH, Gómez-Merino FC, Alcántar-González G, Herrera-Corredor JA, Contreras-Oliva A, Trejo-Téllez LI. 2023. Cloruro de sodio y silicio afectan rendimiento y calidad de frutos de tomate. *Agrociencia* 57(3): 536-563. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2967>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: January 20, 2023.

Approved: April 24, 2023.

Published in *Agrociencia*:

May 10, 2023.

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



en importancia los estados de San Luís Potosí, Michoacán y Jalisco, con producciones de 440 876, 283 259 y 197 679 Mg, respectivamente. En 2021, México avanzó al noveno lugar como país productor de tomate en el mundo, al producir 3.3 millones de Mg, en comparación con 2015, año en que ocupó el décimo lugar. Esto se debe a que en los últimos diez años la tasa promedio anual de producción de esta hortaliza aumentó positivamente un 1.8 % (SAGARPA, 2015; SIAP, 2021). En 2021, México marcó récord en la exportación de tomate rojo al alcanzar un valor de 829 millones de dólares estadounidenses, lo que significó un aumento de 5.1 % interanual (AMHPAC, 2021). Sin embargo, el cultivo de tomate enfrenta problemas de abasto de agua para su producción, y el nivel de sales en las aguas de riego se ha incrementado en los últimos años por efecto del cambio climático global (Khamidov *et al.*, 2022).

El incremento en la salinidad en aguas de riego y tierras cultivadas es un fenómeno global que está afectando severamente la producción agrícola. Se estima que en el mundo existen 831 millones de hectáreas con problemas de salinidad (FAO, 2015). En México, los estados del norte y costeros son los más afectados por este factor de estrés. La salinización es un factor que se presenta con mayor frecuencia de manera natural, aunque también puede ser provocada por actividades humanas. Este fenómeno afecta negativamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos, dado que el incremento del contenido de sales en la zona radicular, provoca toxicidad y desbalance de cationes como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  (Mata-Fernández *et al.*, 2014; CONAGUA, 2018).

Para contrarrestar los efectos de factores de estrés abiótico como la salinidad, actualmente se están usando bioestimulantes inorgánicos como el silicio (Si). El silicio es el segundo elemento más abundante en la tierra, representa el 28.8 % de concentración en la corteza terrestre; forma parte de las partículas del suelo y rocas, en combinación con oxígeno, y en metales silicatados. El Si también se encuentra en la solución del suelo, como ácido silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ). La aplicación de Si ha mostrado efectos benéficos en diversos cultivos, principalmente cereales, lo cuales se caracterizan por su capacidad de almacenar Si tanto en vacuolas como en pared celular. Especies vegetales de las familias Poaceae y Cyperaceae registran el mayor contenido de Si, con valores mayores a 4 % en base materia seca. Igualmente, se ha reportado que el Si mitiga efectos negativos causados por factores de estrés abiótico como sequía y salinidad en plantas (Bauer *et al.*, 2011; Hernández-Apaolaza, 2014; Dehghanipoodeh *et al.*, 2015; Weber *et al.*, 2018; Trejo-Téllez *et al.*, 2022). El abasto de Si en plantas de tomate bajo estrés por boro (B) mejora el peso promedio del fruto (Kaya *et al.*, 2011). En plantas de pepino (*Cucumis sativus*), la aplicación de Si generó aumentos significativos en rendimiento de frutos y mayores contenidos de materia seca y sólidos solubles totales (Jarosz, 2013). En condiciones de estrés salino, el Si incrementó la firmeza y la intensidad del color verde de frutos de pepino (González-Terán *et al.*, 2020). El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de la aplicación foliar de Si a plantas de tomate sometidas a salinidad, en el rendimiento individual de los primeros tres racimos y el acumulado de éstos, así como en variables de calidad de frutos del segundo racimo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del experimento y condiciones experimentales

El experimento se llevó a cabo en un invernadero tipo túnel con ventana cenital, cobertura plástica y malla antiáfidos en paredes laterales, en Montecillo, Estado de México, a 19.46° de latitud norte, 98.90° de longitud oeste, y 2250 m de altitud. Durante la investigación, las temperaturas medias diurna y nocturna fueron de 31.7 y 15.1 °C. La humedad relativa en el día fue de 30 % y de 87 % durante la noche. La duración del fotoperiodo fue, en promedio, de 11.3 h con intensidad luminosa media de 137  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

### Material vegetal

Se usaron plántulas de tomate híbrido cv. Río Supremo, de porte determinado, obtenidas de la siembra de semilla en charolas de 200 cavidades con turba (Premier Horticulture Inc., ProMix FLX, Canadá) como sustrato. Para la prueba de los tratamientos se estableció un sistema hidropónico en invernadero, con plántulas de 32 días después de la siembra (dds), con cinco hojas verdaderas. El sistema hidropónico se estableció en bolsas de polietileno negro, calibre 400, de 30 x 30 x 30 cm, usando la grava volcánica local conocida como tezontle como sustrato inerte, con un tamaño de partícula entre 5 y 6 mm. Las características de este sustrato han sido reportadas previamente (Trejo-Téllez *et al.*, 2013).

### Diseño de tratamientos y diseño experimental

Para la prueba de los tratamientos propuestos, se utilizó un diseño experimental completamente al azar en un arreglo factorial 3<sup>2</sup>. El primer factor de estudio fue la concentración de cloruro de sodio (NaCl; Sigma Aldrich, St. Louis, MO, Estados Unidos) adicionada en la solución nutritiva (SN) en tres niveles: 0, 50 y 100 mM, correspondientes a conductividades eléctricas de 2, 7 y 12  $\text{dS m}^{-1}$  considerando la composición de la SN. Se empleó la solución universal de Steiner (Steiner, 1984). El segundo factor de estudio fue la aplicación foliar de Si, a partir de  $\text{SiO}_2$  (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, Estados Unidos) en tres niveles: 0, 75 y 150  $\text{mg L}^{-1}$ . Al combinar los factores con los niveles evaluados se obtuvieron nueve tratamientos, cada uno con nueve repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta de 61 días después de la siembra, trasplantada en una bolsa de polietileno negro para dar soporte al material vegetal. Las plantas se tutoraron con rafia negra agrícola y se realizaron podas de yemas axilares, para llevarlas a un solo tallo.

Las unidades experimentales se colocaron en el invernadero a una distancia de 0.3 m de separación entre plantas y 0.8 m entre hileras. La adición de las concentraciones de NaCl a la solución nutritiva inició 61 dds. El riego se realizó mediante un sistema por goteo en espagueti. Para ello se colocaron nueve tanques de 200 L, cada recipiente contaba con una bomba de 0.5 HP, un ramaleo de PVC con regreso al tanque, regulado con una válvula y con salida con un filtro de anillos, la cual conectaba con el conducto

primario (manguera negra agrícola de 16 mm de diámetro). Esta línea de conducción contenía cuatro crucetas que conectaban a cuatro tubines, cada uno finalizaba en una estaca. Se realizaron cinco riegos por día de 1 min (de 07:00 a 19:00 h, cada 3 h), con un aforo por estaca de 100 mL.

Las aspersiones foliares con Si iniciaron 62 dds. Todas las aplicaciones se realizaron a las 06:00 h, asperjando las plantas hasta punto de goteo, con un promedio de volumen de solución de 50 mL por planta. Para una mayor adherencia de la solución asperjada a la lámina foliar, se adicionó el surfactante Tween® 20 (SigmaAldrich, St. Louis, MO, Estados Unidos) en una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup>. En total se realizaron ocho aplicaciones foliares en intervalos de 10 días entre aplicaciones. El pH fue de las soluciones asperjadas se ajustó a 4. El experimento duró 80 días, esto es, las plantas alcanzaron 142 dds.

#### Variables evaluadas

Se evaluó el rendimiento de los tres primeros racimos y el acumulado de éstos; la cosecha se hizo cuando los frutos alcanzaron el estado de madurez conocido como rojo de acuerdo con UPOV (2001). Las variables de calidad se evaluaron solamente en frutos del segundo racimo con el grado de madurez antes descrito.

En el jugo del fruto, obtenido con un extractor (Hamilton Beach, 67606-MX, China), se determinó pH y conductividad eléctrica (CE), usando un medidor portátil (Conductronic PC18, Puebla, México). También se determinó la acidez titulable (AT), mediante la metodología propuesta por AOAC (1990), tomando 5 mL del jugo que se aforaron a 50 mL con agua desionizada. De esta solución se tomó una alícuota de 10 mL y se tituló con NaOH 0.01 N. El porcentaje de acidez, con base en el ácido cítrico, se calculó con la siguiente fórmula: ácido cítrico (%) = [(mL NaOH gastados) (N NaOH) (meq del ácido cítrico) (V) (100)] / [(peso de la muestra) (alícuota)]; donde: N = normalidad del NaOH; meq = miliequivalentes del ácido que se encuentra en mayor proporción en el fruto que es el ácido cítrico = 0.064; V = volumen total.

Los sólidos solubles totales (SST) se midieron con un refractómetro digital (ATAGO, PR-100 0-32; Tokio, Japón), colocando una gota de jugo en la celda de la lectura del dispositivo. La relación de los SST y la AT se determinó dividiendo el valor de SST entre el valor de la AT.

#### Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey,  $p \leq 0.05$ ), con el software SAS (SAS Institute, 2011).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Rendimiento

El rendimiento de los tres racimos y el acumulado fue influenciado de manera significativa por el factor NaCl; aunque no así por el factor Si. La interacción de los factores de estudio NaCl × Si tuvo influencia en el rendimiento del tercer racimo (Cuadro 1).

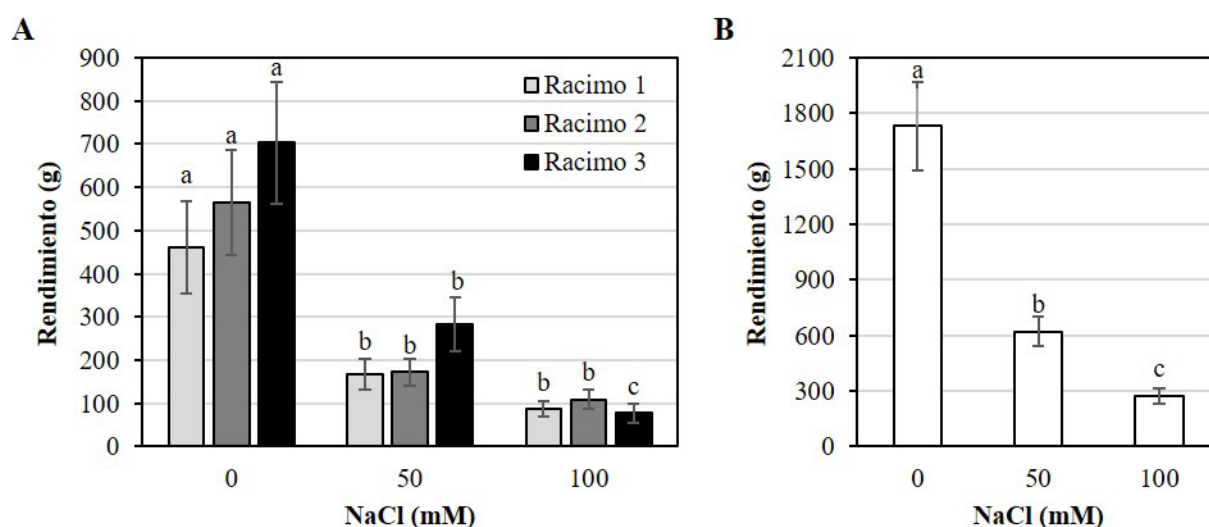
**Cuadro 1.** Significancia de los factores de estudio NaCl, Si, y sus interacciones, en el rendimiento de tres racimos de frutos y acumulado de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo.

Fuente de variación	Rendimiento			
	Primer racimo	Segundo racimo	Tercer Racimo	Acumulado de tres racimos
NaCl	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *
Si	0.8265 ns	0.8105 ns	0.1185 ns	0.6609 ns
NaCl × Si	0.3527 ns	0.9226 ns	0.0002 *	0.6598 ns

\* = significativo ( $p \leq 0.05$ ); ns = no significativo ( $p > 0.05$ ).

La ausencia de efecto del Si en rendimiento en tomate observado en este estudio (Cuadro 1) es coincidente con lo reportado en trigo (*Triticum aestivum*), cultivo en el que aplicaciones foliares de Si no afectaron ni rendimiento ni calidad de grano en cinco cultivares analizados (Segalin *et al.*, 2013).

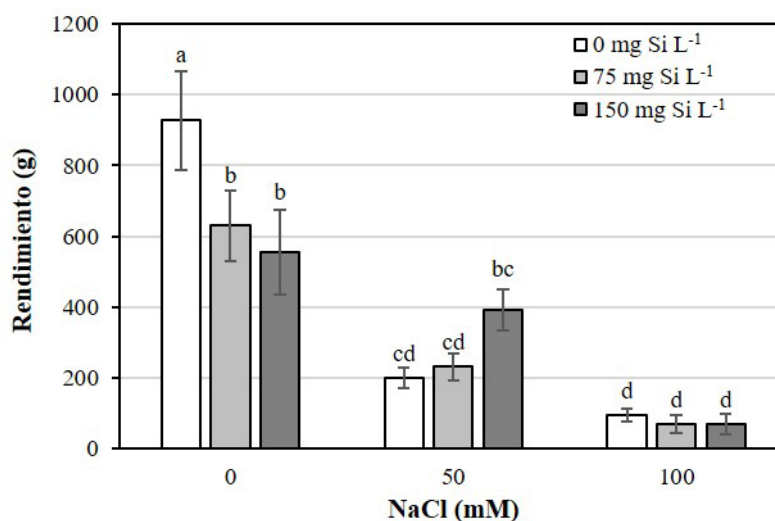
**Efectos significativos de NaCl en rendimiento.** En comparación con el testigo, las aplicaciones de 50 y 100 mM NaCl disminuyeron el rendimiento del primer racimo en 63.8 y 81 %, respectivamente; los decrementos en el segundo racimo fueron de 70 y 80.7 %; mientras que, en el tercero fueron de 60.9 y 88.8 %, respectivamente (Figura 1A). En el rendimiento acumulado de los tres racimos, la reducción fue de 64.6 y 84.1 % con la adición de 50 y 100 mM NaCl, respectivamente, en comparación con el



**Figura 1.** Rendimiento por racimo (A) y acumulado de tres racimos (B) en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo tratadas con diferentes concentraciones de NaCl. Medias de rendimiento por racimo y acumulado  $\pm$  DE con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

testigo (Figura 1B). Estos resultados coinciden con los obtenidos en un estudio similar, en donde trataron cuatro razas de tomates (Campeche, Oaxaca, Puebla y Veracruz) y un híbrido comercial (Vengador) con cuatro niveles de salinidad (0, 30, 60 y 90 mM NaCl), y encontraron que el rendimiento por planta disminuyó para las cuatro razas y el híbrido al incrementar los niveles de salinidad (Ladewig *et al.*, 2021). En sandía (*Citrullus lanatus*), la aplicación de soluciones salinas de 2.0 a 5.2 dS m<sup>-1</sup> disminuyeron el peso medio de fruto y el rendimiento total (Colla *et al.*, 2006). En chile (*Capsicum annuum*), aplicaciones salinas de 4 y 8 dS m<sup>-1</sup> disminuyen el peso fresco del fruto (Grimaldo-Pantoja *et al.*, 2017). Líneas de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) evaluadas en suelo salino con un valor de CE de 5.8 dS m<sup>-1</sup>, redujeron cantidad de vainas y granos por planta, lo que se atribuyó a la afectación de rutas bioquímicas en procesos fisiológicos, así como a cambios en la concentración y en la relación de hormonas endógenas que intervienen en crecimiento y desarrollo vegetal (López-Sánchez *et al.*, 2018).

**Efectos significativos de la interacción NaCl × Si en rendimiento.** El rendimiento del tercer racimo se redujo debido a la interacción de los factores de estudio (Figura 2). En ausencia de sal, el Si redujo el rendimiento. En el resto de los niveles de salinidad no se presentaron diferencias por la adición de Si entre tratamientos (Figura 2). Diversos estudios evidencian la influencia benéfica del Si en el rendimiento de plantas de tomate cuando son sometidas a algún tipo de estrés (Toresano-Sánchez *et al.*, 2012; Jarosz, 2014). En nuestro estudio, la adición de 150 mg Si L<sup>-1</sup> en plantas expuestas a 50 mM NaCl tendió a aumentar este parámetro, aunque las diferencias no fueron significativas.



**Figura 2.** Rendimiento del tercer racimo plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo tratadas con diferentes concentraciones de NaCl y Si. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

### Calidad de frutos

El factor NaCl y su interacción con Si tuvieron efectos significativos en todos los parámetros de calidad de fruto evaluados. Como factor individual, la aplicación foliar de Si solo afectó los valores de pH, CE y relación SST/AT (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Significancia de los factores de estudio NaCl, y sus interacciones, en las propiedades químicas de calidad de fruto evaluadas en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo.

Fuente de variación	pH	CE	SST	AT	SST/AT
NaCl	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *
Si	0.0017 *	0.0001 *	0.8497 ns	0.2828 ns	0.0344 *
NaCl × Si	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *	<0.0001 *

\* = significativo ( $p \leq 0.05$ ); ns = no significativo ( $p > 0.05$ ). CE: conductividad eléctrica; SST: sólidos solubles totales; AT: acidez titulable.

**Efectos significativos de NaCl en calidad de fruto.** Algunos indicadores de calidad de fruto de tomate son afectados positivamente cuando las plantas son expuestas a estrés salino (Zhang *et al.*, 2016). En este estudio, el pH del fruto se redujo con las dosis de salinidad evaluadas (Cuadro 3). Frutos de tomate destinados a la industria deben tener un pH de 4.4 para inactivar microorganismos descomponedores (Villegas-Espinoza *et al.*, 2018). En nuestro estudio, los valores de pH de frutos fueron inferiores a los referidos, lo que es indicativo de mayor calidad y posible mayor vida de anaquel.

Las aplicaciones de 50 y 100 mM NaCl incrementaron la CE del jugo en 74 y 71.9 % respecto al testigo. También se registraron incrementos de 83.8 y 76.6 % en los SST, con respecto al testigo. La adición de NaCl a la solución nutritiva también incrementó la relación SST/AT en promedio en 9.7 %, con respecto al testigo (Cuadro 3). Estos resultados son consistentes con lo reportado por otras investigaciones (Li *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2014; Zushi y Matsuzoe, 2015; Zhang *et al.*, 2016; Villegas-Espinoza *et al.*, 2018). Como consecuencia de la alta concentración de sales en la raíz (efecto osmótico), se

**Cuadro 3.** Efecto principal del factor de estudio NaCl en las propiedades químicas de calidad de fruto evaluadas en tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo.

NaCl (mM)	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	SST (°Brix)	AT (% ácido cítrico)	Relación SST/AT
0	4.17 ± 0.015 a	5.12 ± 0.078 b	4.99 ± 0.069 c	0.44 ± 0.027 b	11.65 ± 0.420 b
50	4.05 ± 0.032 b	8.91 ± 0.593 a	9.17 ± 0.411 a	0.72 ± 0.045 a	13.05 ± 0.285 a
100	4.03 ± 0.018 b	8.80 ± 0.570 a	8.81 ± 0.482 b	0.73 ± 0.082 a	12.52 ± 0.695 a

Medias ± DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). CE: conductividad eléctrica; SST: sólidos solubles totales; AT: acidez titulable.

inhibe el flujo de agua a partes aéreas y se incrementa la concentración de carbohidratos (sólidos solubles totales), a fin de reducir el estrés oxidativo provocado por la falta de agua en las células (Zahra *et al.*, 2011). La salinidad moderada fomenta la actividad de la enzima sacarosa invertasa que permite liberar hexosas durante la maduración, lo que redundaría en mayor acumulación de azúcares en fruto (Lu *et al.*, 2012; Moles *et al.*, 2019). Debido al transporte reducido de agua causado por la salinidad, las plantas incrementan la producción de ácidos orgánicos (oxaloacético y  $\alpha$ -cetoglutárico), con el fin de sintetizar aminoácidos como glutamato, asparagina,  $\gamma$ -aminobutírico (GABA) y prolina, los cuales cumplen una función antioxidante y osmoprotectante (Sato *et al.*, 2006).

Las aplicaciones de NaCl aumentaron en promedio en 64.8 % la acidez del jugo de tomate, en comparación con el testigo (Cuadro 3). El aumento de la acidez es una respuesta común a la salinidad, ya que promueve la actividad del ciclo de Krebs (Zushi y Matsuzoe, 2015).

**Efectos significativos de Si en calidad del fruto.** El pH es un factor determinante en la calidad de frutos, ya que puede inactivar patógenos descomponedores y disminuir la tasa de respiración, lo que prolonga la vida de anaquel del fruto (Turhan *et al.*, 2011; Tigist *et al.*, 2013). La aplicación foliar de 75 mg Si L<sup>-1</sup> disminuyó de manera significativa en 0.6 % el pH del jugo del fruto, respecto al testigo (Cuadro 4). El rango de pH obtenido en el presente estudio osciló entre 4.08 y 4.10, valores menores a los reportados en tomate por diversos autores: 4.12-4.35 (Turhan *et al.*, 2011), 4.21-4.80 (Giannakoula e Ilias, 2013) y 4.09-4.21 (Korkmaz *et al.*, 2018). En Chile, el tratamiento con Si ocasiona rangos en el pH de fruto de 5.53 a 5.70 (Jayawardana *et al.*, 2014) y en pepino de 5.21 a 5.23 (González-Terán *et al.*, 2020). De igual manera, la dosis 150 mg Si L<sup>-1</sup> disminuyó 6.1 % la conductividad eléctrica del fruto, en comparación con el testigo (Cuadro 4). Esta tendencia también se observó en sábila (*Aloe barbadensis*) (Xu *et al.*, 2015) y en pepino (González-Terán *et al.*, 2020).

La adición de Si a plantas bajo estrés salino ajusta el potencial osmótico de las células a través de una mayor acumulación de osmolitos como iones inorgánicos, azúcares

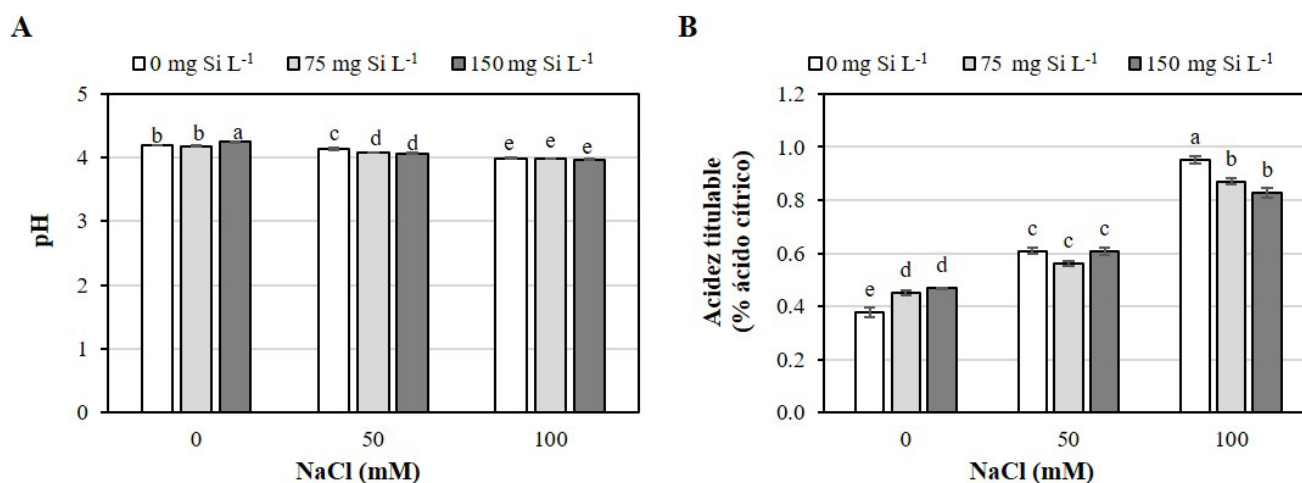
**Cuadro 4.** Efecto principal del factor de estudio Si en las propiedades químicas de calidad de fruto evaluadas en tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo.

Si (mg L <sup>-1</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Relación SST/AT
0	4.10 ± 0.044 a	7.6 ± 1.096 a	12.03 ± 0.609 b
75	4.08 ± 0.042 b	7.6 ± 1.040 a	12.17 ± 0.389 ab
150	4.09 ± 0.059 ab	7.1 ± 1.223 b	12.55 ± 0.330 a

Medias ± DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). CE = conductividad eléctrica; SST = sólidos solubles totales; AT = acidez titulable.

solubles y prolina (Coskun *et al.*, 2016). La aplicación foliar de 150 mg L<sup>-1</sup> Si incrementó la relación SST/AT en 4.3 %, con respecto al testigo (Cuadro 4). Efectos similares fueron encontrados en tomate (Stamatakis *et al.*, 2003; Iglesias *et al.*, 2015) y en fresa (*Fragaria × ananassa*) (Weber *et al.*, 2018). Por el contrario, en cuatro variedades de mango (*Mangifera indica*), la aplicación de 1.5 mM Si incrementó significativamente la AT de los frutos, pero no afectó el contenido de SST (Helaly *et al.*, 2017). En tanto, la aplicación de 50 y 100 mg Si L<sup>-1</sup> a plántulas de dos variedades de tomate ocasionó reducciones significativas en los valores de SST y AT (Weerahewa y David, 2015). En frutos de tomate cherry cv. Unicorn tratados con 20 mM Si, se observó disminución de los SST e incremento de la AT (Islam *et al.*, 2018).

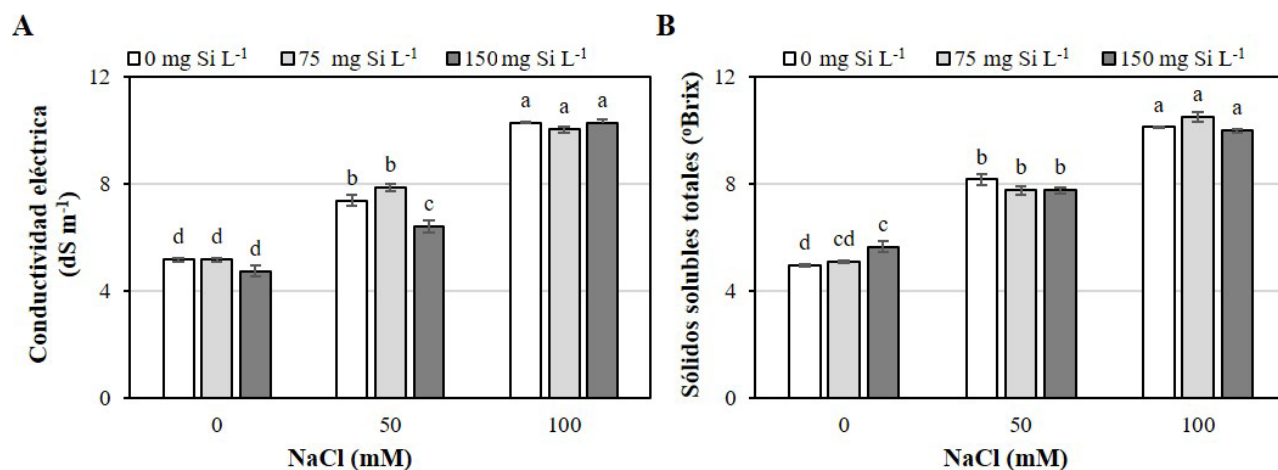
**Efectos significativos de la interacción NaCl × Si en calidad del fruto.** Los efectos de la interacción de los factores de estudio NaCl y Si muestran tendencias significativas en los parámetros de calidad de fruto evaluados (Figuras 3 y 4). Por un lado, la dosis alta de Si evaluada, incrementa en 1.3 % el pH de frutos de plantas sin estrés salino en comparación con el tratamiento sin Si y sin salinidad (Figura 3A). No obstante, en ausencia de salinidad, la acidez titulable se incrementó de manera significativa con los tratamientos con 75 y 150 mg Si L<sup>-1</sup> (Figura 3B). Este efecto fue similar al reportado por Baninaiem *et al.* (2016), al aplicar de 1 a 4 mM Si en tomate cv. Baraka. En el presente estudio, la acidez titulable se redujo significativamente en plantas tratadas con 100 mM NaCl, en presencia de 75 y 100 mg L<sup>-1</sup> Si (Figura 3B). Un efecto contrario fue reportado en plantas de tomate irrigadas con agua salina (12 dS m<sup>-1</sup>) al aplicar hasta 400 ppm K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, lo que incrementó los valores de AT (Elkhatib *et al.*, 2017).



**Figura 3.** Efectos de la interacción de los factores de estudio (NaCl × Si) en el valor de pH (A) y la acidez titulable (B) en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

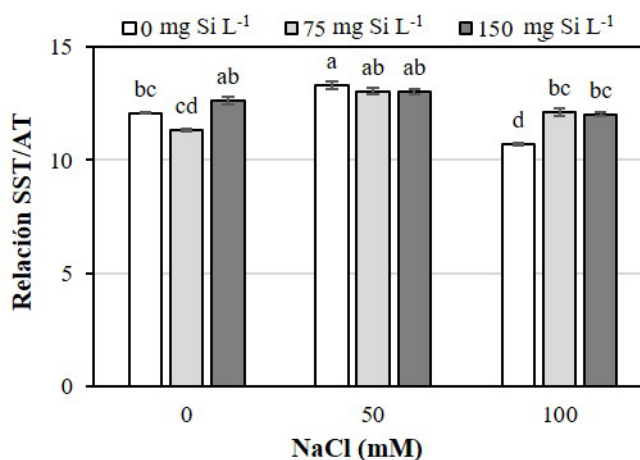
En el presente estudio, plantas tratadas con 50 mM NaCl y asperjadas con 75 o 150 mg L<sup>-1</sup> produjeron frutos con valores de pH 1.6 % inferiores a los observados en los frutos de plantas expuestas a 50 mM NaCl sin Si (Figura 3A).

En plantas tratadas con 150 mg Si L<sup>-1</sup> y 50 mM NaCl, la conductividad eléctrica del fruto se redujo en 13.4 %, en comparación con el tratamiento sin Si y con 50 mM NaCl (Figura 4A). Así también, en ausencia de salinidad, el tratamiento foliar con 150 mg Si L<sup>-1</sup> aumentó 14.1 % la concentración de SST en frutos (Figura 4B). Este efecto también fue observado por Jarosz (2013) en pepino cv. Unicum cultivado en sustrato (turbaarena) al adicionar 750 mg Si L<sup>-1</sup> en la solución nutritiva. Los SST no fueron influenciados por la adición de Si con los niveles de 50 y 100 mM NaCl (Figura 4B), lo que coincide con los reportes de Korkmaz *et al.* (2018) y Costan *et al.* (2019) en tomate, y los de Tabatabaei (2016) en fresa.



**Figura 4.** Efectos de la interacción de los factores de estudio (NaCl × Si) en la conductividad eléctrica (A) y los sólidos solubles totales (B) en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

La relación SST/AT es un indicador de calidad sensorial (sabor) en los frutos (Mikulic-Petkovsek *et al.*, 2012; Weber *et al.*, 2018). En este estudio, ambos niveles de Si (75 y 150 mg Si L<sup>-1</sup>) en combinación con alta salinidad (100 mM NaCl), incrementan en promedio 12.8 %, el valor de la relación SST/AT respecto al tratamiento testigo sin NaCl y sin Si (Figura 5). Esto puede ser debido a que la salinidad reduce la cantidad de agua en el fruto y el Si limita la porción de agua que pasa a través de la raíz por vía apoplástica, lo que reduce la entrada de Na<sup>+</sup> (Stamatakis *et al.*, 2003; Wasti *et al.*, 2017), y genera una mayor acumulación de SST en el fruto (Qin *et al.*, 2016).



**Figura 5.** Efectos de la interacción de los factores de estudio (NaCl × Si) en la conductividad eléctrica (A) y los sólidos solubles totales (B) en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum*) cv. Río Supremo. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

### CONCLUSIONES

Como factores individuales, el cloruro de sodio (NaCl) redujo el rendimiento de frutos de tomate, pero el silicio (Si) no afectó este parámetro. La interacción de ambos factores disminuyó el rendimiento solo en el tercer racimo evaluado. Las variables de calidad fueron afectadas diferencialmente por los niveles de NaCl probados, con efectos benéficos sobre conductividad eléctrica y concentración de sólidos solubles totales. El Si aplicado vía foliar incrementó la relación SST/AT. La interacción de los factores mostró que los efectos del Si aplicado vía foliar son dependientes de los tratamientos salinos. Se concluye que, en condiciones de salinidad, la aplicación de Si mejora atributos de calidad de tomate, a expensas del rendimiento.

### REFERENCIAS

- AMHPAC (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A. C). 2021. México va en el 2021 por nuevo récord en exportación de tomates. Comunicado de prensa publicado por el periódico El Economista el 22 de junio de 2021. Culiacán, Sinaloa, México. <https://www.amhpac.org/es/index.php/en/informacion/noticias/17-noticias/708-mexico-va-en-el-2021-por-nuevo-record-en-exportacion-de-tomates> (Recuperado: mayo 2023)
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 1990. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Helrich K. (ed.). AOAC: Arlington, VA, USA. 1298 p.
- Baninaiem E, Mirzaaliandastjerdi AM, Rastegar S, Abbaszade KH. 2016. Effect of pre-and postharvest salicylic acid treatment on quality characteristics of tomato during cold storage. *Advances in Horticultural Science* 30 (3): 183–192. <https://doi.org/10.13128/ahs-20281>
- Bauer P, Elbaum R, Weiss IM. 2011. Calcium and silicon mineralization in land plants: transport, structure and function. *Plant Science* 180 (6): 746–756. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.01.019>

- Colla G, Roupahel Y, Cardarelli M, Rea E. 2006. Effect of salinity on yield, fruit quality, leaf gas exchange, and mineral composition of grafted watermelon plants. *HortScience* 41 (3): 622–627. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.3.622>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Estadísticas del agua en México. México-Gobierno de la República. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México. [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf) (Recuperado: agosto 2022)
- Coskun D, Britto DT, Huynh WQ, Kronzucker HJ. 2016. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in Plant Science* 7 (1072): 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01072>
- Costan A, Stamatakis A, Chrysargyris, Petropoulos SA, Tzortzakis N. 2019. 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>
- Dehghanipoodeh S, Ghobadi C, Baninasab B, Gheysari M, Bidabadi SS. 2015. Effects of potassium silicate and nanosilica on quantitative and qualitative characteristics of a commercial strawberry (*Fragaria × ananassa* cv. Camarosa). *Journal of Plant Nutrition* 39 (4): 502–507. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1086789>
- Elkhatib AH, Gabr MS, Roshdy HA, Al-Haleem AM. 2017. The impacts of silicon and salicylic acid amendments on yield and fruit quality of salinity stressed tomato plants. *Alexandria Science Exchange Journal* 38 (4): 933–939. <https://doi.org/10.21608/ASEJAIQJSAE.2017.4857>
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 2015. Status of the world's soil resources. FAO, Rome.
- Giannakoula AE, Ilias IF. 2013. The effect of water stress and salinity on growth and physiology of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Archives of Biological Sciences* 65 (2): 611–620. <https://doi.org/10.2298/ABS1302611G>
- González-Terán G, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI. 2020. Effects of silicon and calcium on growth, yield and fruit quality parameters of cucumber established in a sodic soil. *Acta Scientiarum Poloniarum. Hortorum Cultus* 19 (3): 149–158. <https://doi.org/10.24326/as-phc.2020.3.13>
- Grimaldo-Pantoja GL, Niu G, Sun Y, Castro-Rocha A, Álvarez-Parrilla E, Flores-Márgez JP, Corral-Díaz B, Osuna-Ávila P. 2017. Efecto negativo del riego salino en componentes del rendimiento y fitoquímicos de chile (*Capsicum annuum*) inoculado con hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40 (2): 141–149.
- Helaly MN, El-Hoseiny H, El-Sheery NI, Rastogi A, Kalaji HM. 2017. Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant Physiology and Biochemistry* 118: 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.021>
- Hernández-Apaolaza L. 2014. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. *Planta* 240 (1): 447–458. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>
- Iglesias MJ, García-López J, Collados-Luján JF, López-Ortiz F, Díaz M, Toresano F, Camacho F. 2015. Differential response to environmental and nutritional factors of high-quality tomato varieties. *Food Chemistry* 176: 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.043>
- Islam MZ, Mele MA, Choi KY, Kang HM. 2018. The effect of silicon and boron foliar application on the quality and shelf life of cherry tomatoes. *Zemdirbyste Agriculture* 105 (2): 159–164. <https://doi.org/10.13080/z-a.2018.105.020>
- Jarosz Z. 2013. The effect of silicon application and type of substrate on yield and chemical composition of leaves and fruit of cucumber. *Journal of Elementology* 18 (3): 403–414. <https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.3.05>
- Jarosz Z. 2014. The effect of silicon application and type of medium on yielding and chemical composition of tomato. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus* 13 (4): 171–183.
- Jayawardana HARK, Weerahewa HLD, Saparamadu MDJS. 2014. Effect of root or foliar application of soluble silicon on plant growth, fruit quality and anthracnose development of *Capsicum*. *Tropical Agricultural Research* 26 (1): 74–81.
- Khamidov M, Ishchanov J, Hamidov A, Donmez C, Djumaboev K. 2022. Assessment of soil salinity changes under the climate change in the Khorezm Region, Uzbekistan. *International*

- Journal of Environmental Research and Public Health 19 (14): 8794. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148794>
- Kaya C, Levent TA, Guneri M, Ashraf M. 2011. Mitigation effects of silicon on tomato plants bearing fruit grown at high boron levels. *Journal of Plant Nutrition* 34 (13): 1985–1994. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.610485>
- Korkmaz A., Karagöl A, Akinoğlu G, Korkmaz H. 2018. The effects of silicon on nutrient levels and yields of tomatoes under saline stress in artificial medium culture. *Journal of Plant Nutrition* 41 (1): 123–135. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1381975>
- Ladewig P, Trejo-Téllez LI, Servín-Juárez R, Contreras-Oliva A, Gómez-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): 1–15. <https://doi.org/10.15835/nbha49112005>
- Li YL, Stanghellini C, Challa H. 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Scientia Horticulturae* 88 (1): 11–29. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(00\)00190-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(00)00190-4)
- Liu FY, Li KT, Yang WJ. 2014. Differential responses to short-term salinity stress of heat-tolerant cherry tomato cultivars grown at high temperatures. *Horticulture, Environment and Biotechnology* 55 (2): 79–90. <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0127-1>
- López-Sánchez RC, Gómez-Padilla E, Campos-Posada R, Eichler-Löbermann B, Rodríguez-Larramendi LA, Guevara-Hernández F, Gongora-Mora G. 2018. Afectaciones en el rendimiento de líneas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) provocado por salinidad. *Cultivos Tropicales* 39 (1): 74–80.
- Lu SW, Qi F, Li TL. 2012. Effects of salt stress on sugar content and sucrose metabolism in tomato fruit. *China Vegetables* 1 (20): 56–61.
- Mata-Fernández I, Rodríguez-Gamiño, ML, López-Blanco J, Vela-Correa G. 2014. Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente* 1 (5): 26–35.
- Mikulic-Petkovsek M., Schmitzer V, Slatnar A, Stampar F, Veberic R. 2012. Composition of sugars, organic acids, and total phenolics in 25 wild or cultivated berry species. *Journal of Food Science* 77 (10): C1064–C1070. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02896.x>
- Moles TM, de Brito-Francisco R, Mariotti L, Pompeiano A, Lupini A, Incrocci L, Carmassi G, Scartazza A, Pistelli L, Guglielminetti L, Pardossi A, Sunseri F, Hörtensteiner S, Santelia D. 2019. Salinity in autumn-winter season and fruit quality of tomato landraces. *Frontiers in Plant Science* 10 (1078): 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01078>
- Qin L, Kang WH, Qi YL, Zhang ZW, Wang N. 2016. The influence of silicon application on growth and photosynthesis response of salt stressed grapevines (*Vitis vinifera* L.). *Acta Physiologiae Plantarum* 38 (68): 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2087-9>
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2015. Se consolida México como primer exportador mundial de tomate. *Boletín de prensa*. <http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/Paginas/2015B466.aspx> (Recuperado: julio 2022).
- SAS Institute. 2011. *Base SAS® 9.3 Procedures Guide: Statistical Procedures*. Cary, NC, USA. 536 p.
- Sato S, Sakaguchi S, Furukawa H, Ikeda H. 2006. Effects of NaCl application to hydroponic nutrient solution on fruit characteristics of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae* 109 (3): 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.05.003>
- Segalin SR, Huth C, Rosa TDA, Pahins DB, Mertz LM, Nunes UR, Martín TN. 2013. Foliar application of silicon and the effect on wheat seed yield and quality. *Journal of Seed Science* 35 (1): 86–91.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2022. *Panorama agroalimentario 2022*. <https://drive.google.com/file/d/1jVWS4EFKK7HGwQOBpGeljUyaDT8X8Iyz/view> (Recuperado: abril 2023).
- Stamatakis A, Papadantonakis N, Savvas D, Lydakis-Simantiris N, Kefalas P. 2003. Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. *Acta Horticulturae* 609 (18): 141–147. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.609.18>

- Steiner A. 1984. The universal nutrient solution. *In* Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture. Secretariat of ISOSC (ed.). Lunteren 29 April-5 May. International Society of Soilless Culture: Wageningen, Netherlands, pp: 633–649.
- Tabatabaei SJ. 2016. Interactive effects of Si and NaCl on growth, yield, photosynthesis, and ions content in strawberry (*Fragaria × ananassa* var. Camarosa). *Journal of Plant Nutrition* 39 (11): 1524–1535. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1161771>
- Tigist M, Workneh TS, Woldetsadik K. 2013. Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. *Journal of Food Science and Technology* 50 (3): 477–486. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0378-0>
- Toresano-Sánchez F, Valverde-García A, Camacho-Ferre F. 2012. Effect of the application of silicon hydroxide on yield and quality of cherry tomato. *Journal of Plant Nutrition* 35 (4): 567–590. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.644375>
- Trejo-Téllez LI, Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC, García-Albarado JC, Baca-Castillo GA, Tejeda-Sartorius O. 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2013 (5): 863–876.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Trejo LF, Escobar-Sepúlveda HF, Gómez-Merino GM. 2022. The genetics of silicon accumulation in plants. *In* Etesami H, Al-Saeedi AH, El-Ramady H, Fujita M, Pessarakli M, Hossain MA (eds.), *Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement*. Elsevier-Academic Press: Amsterdam, Netherlands, pp: 67–75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00011-X>
- Turhan A, Ozmen N, Serbeci MS, Seniz V. 2011. Effects of grafting on different rootstocks on tomato fruit yield and quality. *Horticultural Science* 38 (4): 142–149.
- UPOV (Union for the Protection of New Varieties of Plants). 2001. Guidelines for the conduct of test for distinctness, uniformity and stability: tomato. [http://www.upov.int/en/publications/tg-rom/tg044/tg\\_44\\_10.pdf](http://www.upov.int/en/publications/tg-rom/tg044/tg_44_10.pdf) (Recuperado: julio 2022).
- Villegas-Espinoza JA, Reyes-Pérez JJ, Nieto-Garibay A, Ruiz-Espinoza FH, Cruz-Falcón A, Murillo-Amador B. 2018. Bioestimulante Liplant®: su efecto en *Solanum lycopersicum* (L.) cultivado en suelos ligeramente salinos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9 (20): 4137–4147. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.985>
- Wasti S, Manaa A, Mimouni H, Nsairi A, Ibtissem M, Gharbi E, Gautier H, Ahmed HB. 2017. Exogenous application of calcium silicate improves salt tolerance in two contrasting tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivars. *Journal of Plant Nutrition* 40 (5): 673–684. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1250908>
- Weber N, Schmitzer V, Jakopic J, Stampar F. 2018. First fruit in season: seaweed extract and silicon advance organic strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) fruit formation and yield. *Scientia Horticulturae* 242: 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.07.038>
- Weerahewa HLD, David D. 2015. Effect of silicon and potassium on tomato anthracnose and on the postharvest quality of tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka* 43 (3): 273–280. <http://doi.org/10.4038/jnsfsr.v43i3.7959>
- Xu CX, Ma YP, Liu YL. 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany* 98: 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.008>
- Zahra S, Amin B, Ali VSM, Ali Y, Mehdi Y. 2011. The salicylic acid effect on the tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill.) sugar, protein and proline contents under salinity stress (NaCl). *Journal of Biophysics and Structural Biology* 2 (3): 35–41.
- Zhang P, Senge M, Dai Y. 2016. Effects of salinity stress on growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under hydroponics system. *Reviews in Agricultural Science* 4 (1): 46–55. <https://doi.org/10.7831/ras.4.46>
- Zushi K, Matsuzoe N. 2015. Metabolic profile of organoleptic and health-promoting qualities in two tomato cultivars subjected to salt stress and their interactions using correlation network analysis. *Scientia Horticulturae* 184: 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.030>

## PRESENCE OF INTERNATIONALLY BANNED PESTICIDES IN DOMESTIC PERUVIAN QUINOA DURING COVID-19 PANDEMIC

Angie Higuchi<sup>1\*</sup>, Rocío Maehara<sup>2</sup>, Roger Merino<sup>3</sup>, Franklin Ibáñez<sup>4</sup>, María Matilde Schwalb<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Pacífico. Department of Business Administration. Avenida Salaverry No. 2020, Jesús María, Lima, Peru. C. P. 15072.

<sup>2</sup> Universidad del Pacífico. Department of Engineering. Avenida Salaverry No. 2020, Jesús María, Lima, Peru. C. P. 15072.

<sup>3</sup> Universidad del Pacífico. Department of Public Management. Avenida Salaverry No. 2020, Jesús María, Lima, Peru. C. P. 15072.

<sup>4</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Faculty of Letters and Human Sciences. Avenida Carlos Germán Amezaga No. 375, Cercado de Lima, Lima, Peru. C. P. 15001.

<sup>5</sup> Universidad del Pacífico. Department of Business Administration. Avenida Salaverry No. 2020, Jesús María, Lima, Peru. C. P. 15072.

\* Author for correspondence: a.higuchi@up.edu.pe

### ABSTRACT

The global showcase for the promotion of the Andean grain quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) resulted in a rapid increase in international demand, which has had a direct impact on Peruvian food safety. The excessive use of pesticides results in high levels of pesticide residues in food, causing both environmental and health problems in the population. The objective of this article was to analyze if residues of internationally banned pesticides were present in the quinoa consumed by Peruvians during the COVID-19 pandemic. Twenty-seven different brands of packed white quinoa (10 sold as organically certified and 17 sold as conventional) were purchased in various supermarkets and bio-shops across metropolitan Lima on January 26, 2021. The pesticide residues in the samples were determined in a laboratory. The study found that Peruvian quinoa not only contained residues of internationally banned pesticides, but also had levels that exceed the maximum residue limits (MRLs) established by the European Union. For consumer safety, it is important that the government make the proposed regulations regarding hazardous pesticides clear to the public.

**Keywords** Food safety, fake organic, Peruvian *Chenopodium quinoa* Willd., MRL.

### INTRODUCTION

Pesticides contribute to increased food production by allowing the intensive use of available land. Nevertheless, their overuse and inadequate selection result in high levels of pesticide residues in the food being consumed (de O Gomes *et al.*, 2020). The use of plant protection chemicals may therefore result in the introduction of hazardous substances into the food chain. Pesticide-induced food poisoning raises health risks such as infertility and birth defects (Abubakar *et al.*, 2020). Despite efforts by many governments to improve the situation concerning pesticide use, the lack of

**Citation:** Higuchi A, Maehara R, Merino R, Ibáñez F, Schwalb MM. 2023. Presence of internationally banned pesticides in domestic Peruvian quinoa during COVID-19 pandemic. *Agrociencia* 57(3): 564-588. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2686>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: April 03, 2022.  
Approved: February 28, 2023.  
**Published in Agrociencia:**  
April 26, 2023.

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



safety precautions still results in significant contamination, not only in the field but also in the health of farmers and consumers.

The United Nations designated 2013 as the International Year of Quinoa (IYQ), stating that quinoa is an ally in the fight against hunger and food insecurity. The worldwide showcase for the promotion of this Andean grain resulted in a rapid increase in international demand, especially from the United States, which accounted for 34 % of Peruvian exports in 2016 (MINAGRI, 2017). In order to meet the growing demand for quinoa around the world, quinoa crops in Peru have been treated with pesticides to increase productivity. Unfortunately, these practices have resulted in higher pesticide residue levels.

In 2014, official quality controls in the United States rejected containers carrying Peruvian quinoa as the products exceeded the Maximum Residue Level (MRL) of pesticides allowed in the country, resulting in 200 MT of quinoa being rejected (Nolte, 2014). The MRL is the highest level of pesticide residue legally tolerated in or on food or feed when pesticides are correctly applied (European Commission, 2021). These exports, which did not meet safety regulations and were rejected by other countries, were redirected for national consumption and ended up in local brands currently being consumed by Peruvians (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018). As the Government has been promoting quinoa consumption within Peru, consumers are at increased risk of consuming hazardous levels of pesticides without being aware of the pesticide content in the quinoa they are eating.

There is currently significant interest in environmental pollutants in relation to food security, as several studies have linked the presence of pesticides to adverse health effects in people (Ortega *et al.*, 2016). Pesticides are classified as carcinogenic, neurotoxic, or teratogenic (harmful to a fetus) based on their potential health effects (WHO, 2019). Pesticides from chemical groups such as organophosphates, pyrethroids, and carbamates can produce acute intoxication symptoms such as weakness, vomiting, and seizures, as well as chronic problems involving delayed neurological effects, liver damage, and chromosomal changes. It should be noted that even if a product is washed or boiled, agrochemicals may remain, and their residue can accumulate in the body over time, causing damage (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021).

During the COVID-19 pandemic, Peru faced significant pressure on food security (Sierra y Selva Exportadora, 2020). Domestic food contamination under these circumstances is worrisome. Unfortunately, the Peruvian population is not well-informed about the risks associated with the daily consumption of contaminated products (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018). While there is a considerable amount of literature highlighting the problematic use of highly toxic pesticides and the lack of regulation and enforcement in developing countries, there is a lack of scientific research that describes and measures the level of contamination of quinoa produced and commercialized in Peru. Therefore, the objective of this article is to analyze if residues of internationally banned pesticides were present in quinoa that Peruvians consumed during the COVID-19 pandemic.

## MATERIALS AND METHODS

This study is focused on the white quinoa variety, which exhibits a consumer preference of approximately 90 % compared to other varieties (Sierra y Selva Exportadora, 2020). To obtain white quinoa samples, 27 packages with different branding were purchased from various supermarkets and health food stores in metropolitan Lima on January 26, 2021, in the midst of the COVID-19 pandemic. It was observed that 10 packages were sold as organic quinoa. Nonetheless in reality, these packages were conventional quinoa labelled as organic certified. This highlights the issue of certain quinoa companies falsely advertising their products as organic, while in reality they are conventional products (fake organics). Unfortunately, it is not uncommon for food companies to use organic logos without proper certifications (Food Fraud Advisors, 2020).

For the analysis, the domestic quinoa samples were packaged in plastic bags with a weight ranging from 0.25 to 1 kg. The bags were transported and stored under cool conditions until analysis. On the same day of purchase, the samples were analyzed under the commissioning and supervision of the authors in the Merieux Nutrisciences laboratory, which is a certified food testing facility with a global presence. To ensure a comprehensive assessment of pesticide contamination, a QuEChERS extraction method was used in combination with Agilent gas chromatography equipment coupled to a tandem mass spectrometer using multi-residue gas chromatography (GC-MSMS) with the P-ME-FQ.04 method. The analysis was complemented using liquid chromatography (LC-MSMS) with the P-ME-FQ.03 method (Calderón *et al.*, 2022). The Quality Control/Quality Assurance (QA/QC) data included the use of a fortified white sample at the Limit of Quantification (LOQ) and blank samples (reactive blank and quinoa blank). No duplicate samples were used. However, international reference standards such as ISO 17034 were used as quality controls in each analysis batch to evaluate for process contamination. In accordance with the EU guidance document SANTE 11312/2021 standard, the recovery acceptance range for all analyses was set between 60 to 140 %. Any positive results within this recovery percentage range were reported.

The active ingredients of the pesticides were classified based on their chemical nature, which is the most useful classification system for researchers in the field of pesticides and the environment (Zacharia, 2011). In addition, the World Health Organization (WHO, 2019) categorizes pesticides according to their toxicity or hazardous effects. This classification system groups pesticides according to the potential risks to human health resulting from accidental human contact, with pesticides categorized from Class Ib (highly hazardous) to Class III (slightly hazardous) (WHO, 2019; Zacharia, 2011).

As previously mentioned, the Maximum Residue Limit (MRL) represents the legal upper limit for a pesticide residue in food. This considers the protection of all consumers, particularly those most vulnerable, such as children, vegetarians, and pregnant women (Cantín-Galindo *et al.*, 2016). The MRLs for quinoa crops and related

pesticides were obtained from the MRL database on the European Commission website (European Commission, 2021) and in the UTZ certificate sections (UTZ Certified, 2015). In this research, the non-compliances (number of positives) and/or unauthorized pesticides found in the quinoa samples were identified, documented, and classified based on their chemical group and the WHO categorization, and were then compared against the MRL database.

## RESULTS AND DISCUSSION

Pesticide residues ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) in the samples were identified by chemical group and their toxicity or hazardous effects classification (Table 1) (WHO, 2019).

**Table 1.** Summary statistics for the detected pesticides in the quinoa samples expended in Peruvian markets.

Variable	Description	N (Sample size)	Mean	St. Deviation	Min	Max
Organophosphate ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Detected pesticide from the organophosphate group per pesticide type ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	25	0.016	0.012	0.005	0.065
Carbamate ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Detected pesticide from the carbamate group per pesticide type ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	1	0.021		0.021	0.021
Pyrethroid ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Detected pesticide from the pyrethroid group per pesticide type ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	23	0.015	0.023	0.005	0.120
Others ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Detected pesticide from other groups per pesticide type ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	16	0.029	0.051	0.006	0.220
Class Ib	Highly hazardous pesticides per pesticide type ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	1	0.021		0.021	0.021
Class II	Moderately hazardous pesticides per pesticide type ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	59	0.019	0.031	0.005	0.220
Class III	Slightly hazardous pesticides per pesticide type ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	5	0.015	0.009	0.006	0.029

In Table 2 there is a summary of the statistics for the qualitative variables of the analyzed quinoa samples, in which non-compliances were detected, along with the percentage that these non-conformities represent of the 27 different bags evaluated.

One to eight different pesticides (sum of positives) were found in all 27 packages evaluated. Eight packages (29.6 %) contained one pesticide; 12 packages (44.4 %) contained two pesticides; six of which were marketed as organics; and three packages (11.1 %) contained three pesticides. This situation is consistent with similar situations in other Latin American countries. For instance, in Mexican melon farms without a well-established commercial chain, farmers were found over applying the same pesticide

**Table 2.** Summary statistics for qualitative variables of the quinoa samples expended in Peruvian markets.

Variable	Description	Count (number) of positives							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Positives	Number of positive residues (number of pesticides) found per quinoa product	8 (29.6 %)	12 (44.4 %)	3 (11.1 %)	1 (3.7 %)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	1 (3.7 %)	1 (3.7 %)
Sold as organic positives	Number of positive residues (number of pesticides) found per quinoa product sold as organic	3 (30.0 %)	6 (60.0 %)	1 (10.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)
Conventional positives	Number of positive residues (number of pesticides) found per quinoa product sold as conventional	5 (29.4 %)	6 (35.3 %)	2 (11.8 %)	1 (5.9 %)	1 (5.9 %)	0 (0.0 %)	1 (5.9 %)	1 (5.9 %)
Surpass MRLs	Number of positive residues (number of pesticides) found per quinoa product that surpass MRLs	12 (44.4 %)	2 (7.4 %)	0 (0.0 %)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)
Organophosphate (positives)	Sum of pesticides classified as organophosphate per quinoa brand (bag)	17 (63.0 %)	4 (14.8 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)
Carbamate (positives)	Sum of pesticides classified as carbamates per quinoa brand (bag)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)
Pyrethroid (positives)	Sum of pesticides classified as pyrethroids per quinoa brand (bag)	19 (70.4 %)	2 (7.4 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)
Others (positives)	Sum of other pesticides per quinoa brand (bag)	5 (18.5 %)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	1 (3.7 %)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)
Class Ib	Sum of pesticides classified as highly hazardous per quinoa brand (bag)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)
Class II	Sum of pesticides classified as moderately hazardous per quinoa brand (bag)	9 (33.3 %)	12 (44.4 %)	2 (7.4 %)	2 (7.4 %)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)
Class III	Sum of pesticides classified as slightly hazardous per quinoa brand (bag)	3 (11.1 %)	1 (3.7 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)

or mixing up to six different pesticide products, leading to toxic residue accumulation in fruit, environmental contamination, and farmer intoxication (Vargas-González *et al.*, 2016). In another study by Calderón *et al.* (2022), the presence of 22 pesticide residues in vegetables sold in supermarkets and farmers markets in Chile and Mexico was evaluated, and the dietary risk was estimated. Eleven different pesticides, including carbofuran, chlorpyrifos, cypermethrin, and lambda-cyhalothrin, were found in chard, lettuce, green chili, tomato, and spinach. The total number and concentrations of these pesticides were higher in Mexico (10) than in Chile (3). Lambda-cyhalothrin was the most common residue found in all Chilean and Mexican vegetables.

WHO hazard levels of pesticide residues detected in the various quinoa brands collected in Peruvian market in this study are shown by chemical group (Table 3). Packages that contained mainly organophosphate pesticides (24 out of 25 brands contained this type of pesticide), pyrethroids, and other pesticides mostly belong to the moderately hazardous (Class II) classification. Only one of the detected pesticides belonged to the carbamate classification, which is considered highly hazardous.

**Table 3.** Chemical classification vs. WHO classification of pesticides.

Chemical classification		WHO classification			Total
		Highly hazardous (Class I)	Moderately hazardous (Class II)	Slightly hazardous (Class III)	
Chemical classification	Organophosphate	0 (0.0 %)	24 (96.0 %)	1 (4.0 %)	25 (38.5 %)
	Carbamate	1 (100.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	1 (1.5 %)
	Pyrethroid	0 (0.0 %)	23 (100.0 %)	0 (0.0 %)	23 (35.4 %)
	Other pesticides	0 (0.0 %)	12 (75.0 %)	4 (25.0 %)	16 (24.6 %)
	Total	1 (1.5 %)	59 (90.8 %)	5 (7.7 %)	65 (100.0 %)

Chlorpyrifos and cypermethrin exhibited the highest incidence of detection among the domestically packaged quinoa samples, with presence in 20 and 21 quinoa brands, respectively (Table 4). While chlorpyrifos is known to be effective against

**Table 4.** Pesticide residues found in quinoa packages expended in Peruvian markets.

Type of pesticide	Positives found (%)	EU MRL	Packages above EU MRL (%)	Minimum concentration detected (mg kg <sup>-1</sup> )	Mean concentration detected (mg kg <sup>-1</sup> )	Maximum concentration detected (mg kg <sup>-1</sup> )	LOQ* (mg kg <sup>-1</sup> )
Carbofuran	1 (3.7 %)	0.01	1 (3.7 %)	0.0210	0.0210	0.0210	<0.01
Chlorpyrifos	20 (74.1 %)	0.01	16 (59.3 %)	0.0053	0.0173	0.0650	<0.005
Malathion	1 (3.7 %)	8	0 (0.0 %)	0.0067	0.0067	0.0067	<0.005
Pirimiphos-methyl	4 (14.8 %)	0.5	0 (0.0 %)	0.0052	0.0118	0.0200	<0.005
Cypermethrin	21 (77.8 %)	0.3	0 (0.0 %)	0.0050	0.0152	0.1200	<0.005
Lambda-cyhalothrin	2 (7.4 %)	0.021	1 (3.7 %)	0.0052	0.0131	0.0210	<0.005
2,4-dichlorophenoxyacetic acid	1 (3.7 %)	0.05	0 (0.0 %)	0.0280	0.0280	0.0280	<0.01
Acetamiprid	2 (7.4 %)	0.01	2 (7.4 %)	0.0110	0.1155	0.2200	<0.01
Clothianidin	1 (3.7 %)	0.01	1 (3.7 %)	0.0210	0.0210	0.0210	<0.01
Dimethomorph	2 (7.4 %)	0.01	2 (7.4 %)	0.0150	0.0160	0.0170	<0.01
Fenamidone	1 (3.7 %)	0.01	0 (0.0 %)	0.0056	0.0056	0.0056	<0.005
Imidacloprid	4 (14.8 %)	0.023	1 (3.7 %)	0.0140	0.0180	0.0230	<0.01
Lufenuron	1 (3.7 %)	0.01	1 (3.7 %)	0.0290	0.0290	0.0290	<0.01
Pendimethalin	2 (7.4 %)	0.05	0 (0.0 %)	0.0072	0.0079	0.0085	<0.005
Tebuconazole	1 (3.7 %)	0.02	0 (0.0 %)	0.0100	0.0100	0.0100	<0.005
Thiamethoxam	1 (3.7 %)	0.01	1 (3.7 %)	0.0180	0.0180	0.0180	<0.01

\*LOQ= Limit of Quantification.

various cereal-damaging pests, it has also been shown to pose a risk to human health by impacting the liver, central nervous system, and cardiovascular and respiratory systems (Zacharia, 2011; Lozowicka *et al.*, 2014). Similarly, cypermethrin, a synthetic-pyrethroid pesticide, is highly toxic to fish and insects, including bees. However, it is considered to be less toxic to mammals and birds (Abubakar *et al.*, 2020; Lozowicka *et al.*, 2014).

The results confirm the hypothesis that there is presence of internationally prohibited pesticides in the quinoa consumed by Peruvians during the COVID-19 pandemic. One sample of domestically produced quinoa was found to contain carbofuran at a level exceeding the EU MRL. Even more concerning is that this particular quinoa product was marketed as organic. Carbofuran is one of the most toxic pesticides within the carbamates (Vargas-González *et al.*, 2016) and is classified as a highly hazardous (Class 1b) pesticide (WHO, 2019). Additionally, 16 out of the 27 packages contained chlorpyrifos levels that exceeding the EU MRL. The chemical and toxicological properties of the pesticides detected in the 27 quinoa brands are shown in Table 5.

Calderón *et al.* (2022) found traces of carbofuran in chard samples from Chile, but not in those from Mexico. Notably, carbofuran residues were detected in Chilean chard, despite this pesticide being prohibited in the country. This is particularly concerning as it could pose a potential health threat to vulnerable groups in society. Similarly, in a study conducted in Spain, residue levels of carbofuran, chlorpyrifos, and imidacloprid, which are pesticides that were banned on borage, surpassed the corresponding MRLs in samples taken from the autonomous community of Aragon (Cantín-Galindo *et al.*, 2016). Importantly, none of these pesticides are currently banned in Peru. Results also show that the tested quinoa samples exhibited a considerable non-compliance with the MRLs for pesticides established by the EU. Data on pesticides found in both conventional and “sold as organic” quinoa packages that exceeded the EU MRLs is shown in Table 6.

In this research, 59.3 % (16 packages) of the analyzed quinoa brands containing the chlorpyrifos pesticide exceeded the EU MRL. In contrast, a study by Lozowicka *et al.* (2014) found residues of chlorpyrifos-methyl below the MRL in cereal samples in Kazakhstan. On the other hand, Calderón *et al.* (2022) found high levels of chlorpyrifos in Mexican spinach. The EU banned the use of the chlorpyrifos insecticides since January 31, 2020. In a regulatory committee vote on December 6, 2019, EU countries backed the withdrawal of the authorization for chlorpyrifos and the related substance chlorpyrifos-methyl (Bloomberg Law, 2019), which have been identified as a possible cause of neurological damage in children.

Moreover, out of 16 pesticides found within 10 “sold as organic” quinoa packages, six surpassed the EU MRLs (five for chlorpyrifos and one for carbofuran). In previous research on organic Peruvian quinoa, Ortega *et al.* (2016) demonstrated the presence of dilene dichlorodiphenyldichloroethane (p, p'-DDE) at levels five times higher than the MRL reference in two samples. Nevertheless, Calderón *et al.* (2022) reported that the mean pesticide concentrations in Chile did not exceed the MRLs. In Mexico, nine

**Table 5.** Chemical and toxicological characteristics of the pesticides found in the quinoa samples expended in Peruvian markets.

Type of pesticide	Chemical classification	WHO classification	Banned in EU*	Pesticide watchlist**
Carbofuran	Carbamate	Class Ib	Y	International conventions; acute toxicity; highly toxic to bees
Chlorpyrifos	Organophosphate	Class II	Y	Highly toxic to bees
Malathion	Organophosphate	Class III	Y	Highly toxic to bees
Pirimiphos-methyl	Organophosphate	Class II		Highly toxic to bees
Cypermethrin	Pyrethroid	Class II	Y	Highly toxic to bees
Lambda-cyhalothrin	Pyrethroid	Class II	CFS	H330 (fatal if inhaled); endocrine disruptive chemical; highly toxic to bees
2,4-dichlorophenoxyacetic acid	Other pesticides: phenoxy (herbicide)	Class II		Endocrine disrupting chemical
Acetamiprid	Other pesticides: neonicotinoid (insecticide)	Class II		Highly toxic to bees
Clothianidin	Other pesticides: neonicotinoid (insecticide)	Class II	Y	Highly toxic to bees
Dimethomorph	Other pesticides: morpholine (fungicide)	Class III		Endocrine disrupting chemical
Fenamidone	Other pesticides: imidazole (antifungal)	Class III	Y	Endocrine disrupting chemical; very persistent in water, soil, sediment; very toxic to aquatic organisms
Imidacloprid	Other pesticides: neonicotinoid (insecticide)	Class II	Y	Highly toxic to bees
Lufenuron	Other pesticides: benzoylurea (insecticidal or acaricidal)	Class III	Y	Very bio accumulative; very persistent in water, soil, sediment; very toxic to aquatic organisms; highly toxic to bees
Pendimethalin	Other pesticides: dinitroanilines (pesticide)	Class II	CFS	Very bio accumulative; very persistent in water, soil, sediment
Tebuconazole	Other pesticides: triazole (fungicide, molds)	Class II	CFS	H330 (fatal if inhaled); endocrine disruptive chemical
Thiamethoxam	Other pesticides: neonicotinoid (insecticide)	Class II	Y	Highly toxic to bees

Y: yes; CFS: candidate for substitution. \*PAN (2021). \*\*UTZ Certified (2021).

**Table 6.** Pesticide levels that surpassed the EU MRLs in conventional and “sold as organic” classifications in quinoa samples expended in Peruvian markets.

		Pesticides surpass EU MRLs		Total
		No	Yes	
Conventional vs. sold as organic classification	Conventional	27 (57.4 %)	20 (42.6 %)	47 (72.3 %)
	Sold as organic	12 (66.7 %)	6 (33.3 %)	18 (27.7 %)
	Total	39 (60.0 %)	26 (40.0 %)	65 (100.0 %)

conventional and five organic crops had six pesticides exceeding the EU MRLs. In addition, Nguyen et al. (2022) discovered 18 prohibited substrates for organic rice production in 10 districts of six provinces in the Mekong Delta region of Vietnam. The residual pesticides in rice crops resulted from a violation of organic production processes, including the use of chemical pesticides by farmers to control pests and diseases, and pesticide residues remaining in the soil from previous crops due to the half-life of pesticides (i.e., time for starting material to be reduced by 50 %).

The possible reason for high pesticide residue concentrations in organic crops could be due to illegal usage of pesticides (Food Fraud Advisors, 2020). Ortega *et al.* (2016) proposed that cross-contamination between organic and conventional agriculture could happen since they are frequently cultivated in adjacent lands. However, they also found that organic crops have a lower occurrence of pesticide residue than conventionally produced crops.

In this study we have demonstrated that Peruvian quinoa contains residues of banned pesticides, and the levels of these residues exceed the European MRLs, even in the organic quinoa. These findings are crucial in understanding the pesticide types and residue levels present in quinoa sold in supermarkets and ecomarkets in Lima, Peru. It is essential to note that the use of synthetic pesticides in agriculture not only affects the environment but also poses a threat to human health (UCSD, 2021; Ortega *et al.*, 2016). The exposure to pesticides can lead to short-term or long-term acute effects on human health, particularly in the reproductive, endocrine, and central nervous systems (UCSD, 2021). Furthermore, pesticides have three harmful effects: acute effects, allergic effects, and delayed effects, such as cancer. Therefore, it is crucial to reduce the use of hazardous pesticides to prevent harm to the health of farm workers, their families, and quinoa consumers.

While it is unrealistic to eliminate pesticide use in all crop production, USA authorities have identified and reported numerous illegal pesticide residues in food since 2014. These types of residues were responsible for the rejection of Peruvian quinoa exports, as reported by the FDA (2023). Our study revealed that a significant number of pesticides used in Peruvian quinoa production are prohibited in the EU, with nine of the 16 pesticides banned and three categorized as substitution candidates (CFS) (Table 5). These findings are in full agreement with the review of Li *et al.* (2021), who showed that the top six fruits and vegetables with high toxicity and illegally added pesticides were celery (28 types), apple (26 types), spinach (25 types), garlic chives (24 types), lettuce (23 types), and cucumber (22 types). The detection rates for the highly toxic pesticides dichlorvos and carbofuran were higher.

Based on the residues detected in the samples analyzed, it is evident that domestic quinoa poses a significant health risk to consumers, as the level of toxicity is deemed unacceptable and can lead to acute or chronic health consequences in humans. Domestic consumers are at a greater risk, as the controls for domestic consumption are less stringent compared to those for exported products (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018). The national agency responsible for agricultural safety standards (SENASA) lacks an

action plan for dealing with banned pesticide detection in food and has not established actions to be taken when chemical residues or contaminants exceed permissible levels (SENASA, 2014; 2017).

There is also a lack of government monitoring of the Peruvian domestic food safety norms, which encourages producers to use unapproved pesticide products and inappropriate doses and safety intervals (Vargas-González *et al.*, 2016). In addition, the lack of consumer protection and available information for daily purchases in Peruvian markets (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018) results in the consumption of agricultural products that are highly contaminated with hazardous pesticides, which do not comply with the EU standards. This issue was particularly critical during the COVID-19 pandemic period, where a need for nutritious food to maintain high immunity among the Peruvian population was crucial. Thus, there is a pressing need for continuous monitoring programs and stricter regulations for all agricultural products, not only quinoa, to promote food safety and enhance public health in Peru.

Therefore, the Peruvian government should encourage the use of phytosanitary control alternatives to reduce the dependence on synthetic pesticides in production systems. They should also enforce strict regulations that monitor the appropriate usage of agrochemicals in agricultural regions, apply internal MRL standards to domestic products, and prohibit the usage of highly toxic pesticides (Vargas-González *et al.*, 2016). Conducting epidemiological studies that demonstrate the detrimental effects of pesticides on the health of agricultural workers and the environment is crucial. Furthermore, urgent modifications to current regulations are necessary to implement training programs for both industrial and small-scale farmers. SENASA should establish enforcement mechanisms to monitor pesticide distributors and farmers who lack technical expertise in using pesticides. Institutions such as cooperatives should also take additional measures to act as *de facto* verifiers and increase control over their farmer-members' practices.

To protect crops, particularly cereals, preventative measures must be taken both in the fields and in storage facilities. The most effective way to undertake pest control is through prevention, such as planting certified seeds or using pest-resistant varieties, avoiding monoculture, adhering to the principles of integrated pest management by integrating the pest alert system, rotating and associating plants, and avoiding excess moisture and flooding (Bastantes-Morales *et al.*, 2019). The level of hazardous residues in plant protection products should not surpass the MRLs, as outlined by Lozowicka *et al.* (2014). The Peruvian authorities could adopt the Common Agricultural Policy (CAP) of the European Union as the most appropriate technique for producing healthy and nutritious food for both export and internal consumption (Bastantes-Morales *et al.*, 2019).

Additionally, Peruvian consumers must demand the government to prioritize food safety and establish clear regulations that highlight the ethical and social implications of controlling food safety at the national level. The Peruvian national consumer protection authority (INDECOPI) should also impose penalties on companies that fail

to comply with consumers' food safety rights, particularly regarding the excessive use of pesticides.

### CONCLUSIONS

This study reveals that quinoa in Peru contains internationally banned pesticides at levels that exceed the European Maximum Residue Limits. This finding is disturbing as consuming quinoa with pesticide residues could increase the risk of adverse health effects, particularly for vulnerable populations such as small children and the elderly, which has been decisive to successfully face the effects of the COVID-19 pandemic.

### ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by a 2020 annual internal grant promoted by the vice-presidency for research at Universidad del Pacífico (Lima, Peru). Special thanks to Ivan Huby, José Vinicius da Silva and Sue Jessop for their technical experience and knowledge in different stages of this research.

### REFERENCES

- Abubakar Y, Tijjani H, Egbuna C, Oluwaseun Adetunji C, Kala S, Kryeziu TL, Ifemeje JC, Patrick-Iwuanyanwu KC. 2020. Pesticides, history, and classification. *In* Natural remedies for pest, disease and weed control; Egbuna C, Sawicka B. (eds.). Academic Press: London, UK. pp: 29–42. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04523-5>
- Bastantes-Morales ER, Alconada MM, Pantoja JL. 2019. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) production in the Andean Region: challenges and potentials. *Journal of Experimental Agriculture International* 36 (6): 1–18. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v36i630251>
- Bloomberg Law. 2019. EU to ban chlorpyrifos pesticide starting in February. December 6, 2019. <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/eu-to-ban-chlorpyrifos-pesticide-starting-in-february> (Retrieved: March 2021).
- Calderón R, García-Hernández J, Palma P, Leyva-Morales JB, Zambrano-Soria M, Bastidas-Bastidas PJ, Godoy M. 2022. Assessment of pesticide residues in vegetables commonly consumed in Chile and Mexico: Potential impacts for public health. *Journal of Food Composition and Analysis* 108: 104420. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104420>
- Cantín-Galindo S, Herrero-Mambrona P, Carcas de Benavides MC, Roca-Vela MA, Frutos-Surrio A. 2016. Investigación de residuos de plaguicidas en frutas, verduras y hortalizas y cereales en la Comunidad Autónoma de Aragón durante el periodo 2010-2013. *Revista de Toxicología* 33 (1): 44–49.
- Delgado-Zegarra J, Alvarez-Risco A, Yáñez JA. 2018. Uso indiscriminado de pesticidas y ausencia de control sanitario para el Mercado interno en Perú. *Revista Panamericana de Salud Pública* 42: 1–6. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2018.3>
- European Commission. 2021. Pesticide Residues, EU Pesticides Database. Directorate-General for Health and Food Safety. European Commission. Brussel, Belgium. [https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database\\_en](https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en) (Retrieved: December 2021).
- FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2023. Import alert 99-08: Detection without physical examination of processed human and animal foods for pesticides. Silver Spring, MD, USA. [https://www.accessdata.fda.gov/cms\\_ia/importalert\\_259.html](https://www.accessdata.fda.gov/cms_ia/importalert_259.html) (Retrieved: February 2023).
- Food Fraud Advisors. 2020. Organic food fraud in 2020. August 8, 2020. <https://www.foodfraudadvisors.com/organic-food-fraud-in-2020/> (Retrieved: May 2021).
- de O Gomes H, Menezes JMC, da Costa JGM, Coutinho HDM, Teixeira RNP, do Nascimento RF. 2020. A socio-environmental perspective on pesticide use and food production. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 197 (1): 110627 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110627>

- Li C, Zhu H, Li C, Qian H, Yao W, Guo Y. 2021. The present situation of pesticide residues in China and their removal and transformation during food processing. *Food Chemistry* 354: 129552. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129552>
- Lozowicka B, Kaczynski P, Paritova AE, Kuzembekova GB, Abzhaliyeva AB, Sarsembayeva NB, Alihan K. 2014. Pesticide residues in grain from Kazakhstan and potential health risks associated with exposure to detected pesticides. *Food and Chemical Toxicology* 64: 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.11.038>
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2017. La quinua: Producción y comercio del Perú. Boletín perfil técnico No. 2. Ministerio de Agricultura y Riego, Dirección General de Políticas Agrarias. Lima, Perú. <https://docplayer.es/49009848-La-quinua-produccion-y-comercio-del-peru-perfil-tecnico-n-o-2-direccion-general-de-politicas-agrarias-boletin.html> (Retrieved: February 2021).
- Nguyen CT, Vo TT, Nguyen TX, Nguyen HP, Bui DD, Nguyen VM, Duong VH. 2022. Assessment of pesticide residues in organic rice production in the Mekong Delta, Vietnam. *European Journal of Development Studies* 2 (3): 1–11. <https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2022.2.3.95>
- Nolte GE. 2014. Quinoa Outlook Peru. USDA Foreign Agricultural Service. Lima, Perú. [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Quinoa%20Outlook\\_Lima\\_Peru\\_12-12-2014.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Quinoa%20Outlook_Lima_Peru_12-12-2014.pdf) (Retrieved: February 2021).
- Ortega RE, Zamalloa WA, Tornisielo VL, Zirena F. 2016. Determination of organochlorine pesticides in organic quinoa grains (*Chenopodium quinoa* Willd) by GC- $\mu$ ECD, using the QuEChERS method. *Revista Investigaciones Altoandinas* 18 (1): 19–26.
- PAN (Pesticide Action Network International). 2021. PAN International List of Highly hazardous Pesticides (HHPs). Hamburg, Germany. [https://pan-international.org/wp-content/uploads/PAN\\_HHP\\_List.pdf](https://pan-international.org/wp-content/uploads/PAN_HHP_List.pdf) (Retrieved: December 2022)
- SENASA (Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú). 2014. Informe del monitoreo de residuos químicos y otros contaminantes en granos de quinua (*Chenopodium quinoa*), año 2014. <https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/2016/12/Informe-del-Monitoreo-de-Residuos-Químicos-y-otros-Contaminantes-en-granos-de-quinua-Chenopodium-quinua-año-2014-1.pdf> (Retrieved: February 2021).
- SENASA (Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú). 2017. Informe del monitoreo de residuos químicos y otros contaminantes en alimentos agropecuarios primarios, año 2017. Ministerio de Agricultura y Riego, Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú, Dirección de Insumos Agropecuarios e Inocuidad Agroalimentaria. Lima, Perú. <https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/2018/12/INFORME-FINAL-DEL-PLAN-DE-MONITOREO-2017-1.pdf> (Retrieved: February 2021).
- Sierra y Selva Exportadora. 2020. Análisis de Mercado Quinua 2015–2020. Ministerio de Agricultura y Riego, Sierra y Selva Exportadora. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/sse/informes-publicaciones/1420442-analisis-de-mercado-quinua-2015-2020> (Retrieved: July 2021).
- UCSD (University of California San Diego). 2021. Synthetic Pesticides. San Diego, CA, USA. [http://www.bt.ucsd.edu/synthetic\\_pesticide.html](http://www.bt.ucsd.edu/synthetic_pesticide.html) (Retrieved: December 2021).
- UTZ Certified. 2015. List of Banned Pesticides and Pesticides Watchlist. Standard and Certification Department. Amsterdam, Netherlands. <https://docplayer.net/5254340-List-of-banned-pesticides-and-pesticides-watchlist-version-1-0.html> (Retrieved: December 2021).
- Vargas-González G, Alvarez-Reyna V, Guigón-López C, Cano-Ríos P, Jiménez-Díaz F, Vásquez-Arroyo J, García-Carrillo M. 2016. Patrón de uso de plaguicidas de alto riesgo en el cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) en la Comarca Lagunera. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3 (9): 367–378.
- WHO (World Health Organization). 2019. The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2019. Geneva, Switzerland. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240005662> (Retrieved: March 2021).
- Zacharia JT. 2011. Identity, physical and chemical properties of pesticides. In *Pesticides in the modern world - trends in pesticides analysis*; Stoytcheva M. (ed.). InTech: London, UK, pp: 1–20. <https://doi.org/10.5772/17513>

## PRESENCIA DE PESTICIDAS PROHIBIDOS A NIVEL INTERNACIONAL EN QUINUA PERUANA DURANTE LA PANDEMIA DE COVID-19

Angie Higuchi<sup>1\*</sup>, Rocío Maehara<sup>2</sup>, Roger Merino<sup>3</sup>, Franklin Ibáñez<sup>4</sup>, María Matilde Schwalb<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Pacífico. Departamento de Gestión Comercial. Avenida Salaverry No. 2020, Jesús María, Lima, Perú. C. P. 15072.

<sup>2</sup> Universidad del Pacífico. Departamento de Ingeniería. Avenida Salaverry No. 2020, Jesús María, Lima, Perú. C. P. 15072.

<sup>3</sup> Universidad del Pacífico. Departamento de Gestión Pública. Avenida Salaverry No. 2020, Jesús María, Lima, Perú. C. P. 15072.

<sup>4</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Letras y Ciencias Humanas. Avenida Carlos Germán Amezaga No. 375, Cercado de Lima, Lima, Perú. C. P. 15001.

<sup>5</sup> Universidad del Pacífico. Departamento de Gestión Pública. Avenida Salaverry No. 2020, Jesús María, Lima, Perú. C. P. 15072.

\* Autor para correspondencia: a.higuchi@up.edu.pe

### RESUMEN

La promoción mundial de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) resultó en un rápido aumento de la demanda internacional, lo cual impactó de forma directa en la seguridad alimentaria peruana. El uso excesivo de pesticidas da como resultado altos niveles de residuos químicos en los alimentos, causando problemas ambientales y de salud en la población. El objetivo de este artículo ha sido analizar si aparecieron residuos de pesticidas prohibidos a nivel internacional en la quinua que consumieron los peruanos durante la pandemia del COVID-19. El 26 de enero de 2021, se compraron 27 marcas diferentes de quinua blanca empacada (10 vendidas como orgánicas certificadas y 17 vendidas como convencionales) en varios supermercados y biotiemas de Lima. Los residuos de pesticidas en las muestras se determinaron en un laboratorio. El estudio encontró que la quinua peruana no solo contenía residuos de pesticidas prohibidos a nivel internacional, sino que presentaba niveles que superaban los límites máximos de residuos (LMRs) establecidos en la Unión Europea. Para la seguridad del consumidor, es importante que el gobierno evidencie claramente al público las regulaciones propuestas con respecto a los pesticidas peligrosos.

**Palabras clave:** Seguridad alimentaria, orgánicos falsos, quinua peruana *Chenopodium quinoa* Willd., LMR.

### INTRODUCCIÓN

Los pesticidas contribuyen a aumentar la producción de alimentos porque permiten el uso intensivo de la tierra disponible. Sin embargo, su uso excesivo y selección inadecuada resultan en altos niveles de residuos de pesticidas en los alimentos que se consumen (de O Gomes *et al.*, 2020). Por tanto, el uso de productos químicos para el control de plagas en los cultivos puede resultar en la introducción de sustancias peligrosas a la cadena alimentaria. La intoxicación alimentaria inducida por pesticidas

**Citation:** Higuchi A, Maehara R, Merino R, Ibáñez F, Schwalb MM. 2023. Presence of internationally banned pesticides in domestic Peruvian quinoa during COVID-19.

*Agrociencia* 57(3): 564-588.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2686>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: April 03, 2022.  
Approved: February 28, 2023.  
**Published in *Agrociencia*:**  
April 26, 2023.

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



aumenta los riesgos para la salud, incluyendo infertilidad y defectos congénitos (Abubakar *et al.*, 2020). A pesar de los esfuerzos de muchos gobiernos para mejorar la situación del uso de pesticidas, la falta de medidas de inocuidad alimentaria aún genera una contaminación significativa, no solo en el campo, también en la salud de los agricultores y consumidores.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) designó al 2013 como el Año Internacional de la Quinoa (AIQ), afirmando que este grano andino es un aliado en la lucha contra el hambre y la inseguridad alimentaria. Esta promoción a nivel mundial se tradujo en un rápido aumento de la demanda internacional, en especial de Estados Unidos, que representó el 34 % de las exportaciones peruanas en 2016 (MINAGRI, 2017). Para satisfacer la creciente demanda de quinoa en todo el mundo, los cultivos de quinoa en Perú se trataron con pesticidas para aumentar su rendimiento. Por desgracia, esas prácticas resultaron en niveles más altos de residuos de agroquímicos en las semillas de quinoa.

En 2014, los controles de calidad oficiales en Estados Unidos rechazaron contenedores que transportaban quinoa peruana porque los productos excedían el Límite Máximo de Residuos (LMR) de pesticidas permitidos en el país, lo que resultó en el rechazo de 200 millones de toneladas de quinoa (Nolte, 2014). El LMR es el nivel más alto de residuos de agroquímicos tolerado legalmente en alimentos para humanos o animales cuando los pesticidas se aplican de forma correcta (European Commission, 2021). Esas exportaciones (las que no cumplieron con las normas de seguridad y fueron rechazadas por otros países) se redirigieron al consumo nacional y terminaron en marcas locales que alimentan a los peruanos hasta la actualidad (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018). Como el gobierno ha estado promoviendo el consumo de quinoa en Perú, los consumidores corren un alto riesgo de ingerir niveles peligrosos de pesticidas sin ser conscientes de ello.

Actualmente, existe un gran interés en los contaminantes ambientales en relación con la seguridad alimentaria, ya que varios estudios han relacionado la presencia de pesticidas con efectos adversos en la salud de las personas (Ortega *et al.*, 2016). Los pesticidas se clasifican como cancerígenos, neurotóxicos o teratogénicos (nocivos para el feto) en función de sus posibles efectos sobre la salud (OMS, 2020). Los pesticidas de grupos químicos como los organofosforados, los piretroides y los carbamatos pueden producir síntomas de intoxicación aguda como debilidad, vómitos y convulsiones, así como problemas crónicos que implican efectos neurológicos, daño hepático y cambios cromosómicos. Cabe señalar que, incluso si un producto se lava o hierve, los agroquímicos pueden permanecer, acumulándose en el cuerpo y causando daños a largo plazo (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021).

Durante la pandemia del COVID-19, Perú enfrentó una presión significativa en la seguridad alimentaria (Sierra y Selva Exportadora, 2020). La contaminación de los alimentos nacionales en estas circunstancias es preocupante. Adicionalmente, por desgracia, la población peruana no está bien informada sobre los riesgos asociados al consumo diario de productos contaminados (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018). Si bien existe una cantidad considerable de literatura que destaca el uso problemático

de pesticidas altamente tóxicos (y la falta de regulación y aplicación de sanciones en los países en desarrollo), investigación científica que describa y mida el nivel de contaminación de la quinua producida y comercializada en Perú es escasa. Por ello, el objetivo de este artículo es analizar si los residuos de pesticidas prohibidos internacionalmente estuvieron presentes en la quinua que los peruanos consumieron durante la pandemia de COVID-19.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se enfocó en la variedad de quinua blanca, la cual goza de una preferencia del consumidor de aproximadamente 90 % frente a otras variedades (Sierra y Selva Exportadora, 2020). Para obtener muestras de quinua blanca domésticas, se compraron 27 paquetes de diferentes marcas en varios supermercados y tiendas naturistas de Lima, el 26 de enero de 2021, en medio de la pandemia del COVID-19. Se observó que 10 paquetes se vendieron como quinua orgánica, pero que en realidad eran quinua convencional (que permite pesticidas) etiquetada como orgánica certificada. Esto resalta el problema de que ciertas empresas publicitan falsamente sus productos como orgánicos, cuando en realidad son productos convencionales (orgánicos falsos). Lamentablemente, no es raro que las empresas de alimentos pongan logotipos orgánicos sin las certificaciones adecuadas (Food Fraud Advisors, 2020).

Para efectos del análisis, las muestras de quinua nacional se encontraban envasadas en bolsas de plástico con un peso que oscilaba entre 0.25 y 1 kg. Las bolsas se transportaron y almacenaron en condiciones frías hasta su análisis. El mismo día de la compra, las muestras se analizaron bajo el encargo y la supervisión de los autores en el laboratorio Merieux Nutrisciences (una instalación certificada para el análisis de alimentos con presencia mundial). Para garantizar una evaluación exhaustiva de la contaminación por agrotóxicos, se utilizó un método de extracción QuEChERS en combinación con un equipo de cromatografía de gases Agilent acoplado a un espectrómetro de masas en tándem que utiliza cromatografía de gases de multiresiduos (GC-MSMS) con el método P-ME-FQ.04. El análisis se complementó mediante cromatografía líquida (LC-MSMS) con el método P-ME-FQ.03 (Calderón *et al.*, 2022).

Los datos de control de calidad/garantía de calidad (CC/GC) incluyeron el uso de una muestra blanca fortificada en el límite de cuantificación (LDC) y muestras en blanco (blanco de reactivo y blanco de quinua). No se usaron muestras duplicadas. Como controles de calidad para evaluar la contaminación del proceso, en cada lote de análisis se usaron estándares de referencia internacionales como el ISO 17034. De acuerdo con el documento de orientación de la UE SANTE 11312/2021, el rango de aceptación de recuperación para todos los análisis se estableció entre 60 y 140%. Asimismo, se informó cualquier resultado positivo dentro de este rango de porcentaje de recuperación.

Los ingredientes activos de los pesticidas se clasificaron en función de su naturaleza química, que es el sistema de clasificación más útil para los investigadores en el campo de los agroquímicos y el medio ambiente (Zacharia, 2011). Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020) clasifica los pesticidas según su toxicidad o efectos

peligrosos. Este sistema de clasificación agrupa los agrotóxicos de acuerdo con los riesgos potenciales para la salud humana resultantes del contacto humano accidental, categorizados desde la Clase Ib (altamente peligrosos) a Clase III (ligeramente peligrosos) (OMS, 2020; Zacharia, 2011).

Como se mencionó anteriormente, el Límite Máximo de Residuos (LMR) representa el límite superior legal para un residuo de pesticida en los alimentos. Esto considera la protección de todos los consumidores, pero en particular de los más vulnerables, como niños, vegetarianos, además de mujeres embarazadas (Cantín-Galindo *et al.*, 2016). Los LMRs para pesticidas relacionados con la quinua se obtuvieron de la base de datos de LMR en el sitio web de la Comisión Europea (European Commission, 2021) así como en las secciones de certificados UTZ (UTZ Certified, 2015). En esta investigación, los incumplimientos (número de positivos) y/o agroquímicos no autorizados encontrados en las muestras de quinua se identificaron, documentaron y clasificaron según su grupo químico y la categorización de la OMS, para finalmente ser comparados con la base de datos de LMR.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los residuos de pesticidas en las muestras ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) se identificaron por grupo químico y por su clasificación de toxicidad y/o efectos peligrosos (Cuadro 1), con base en la categorización de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020).

**Cuadro 1.** Resumen de datos estadísticos de los pesticidas detectados en las muestras de quinua evaluadas en mercados de Perú.

Variable	Descripción	N (Tamaño de la muestra)	Media	Desviación estándar	Min	Máx
Organofosforado ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Pesticida detectado del grupo de los organofosforados por tipo de pesticida ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	25	0.016	0.012	0.005	0.065
Carbamato ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Pesticida detectado del grupo de los carbamatos por tipo de pesticida ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	1	0.021		0.021	0.021
Piretroide ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Pesticida detectado del grupo de los piretroides por tipo de pesticida ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	23	0.015	0.023	0.005	0.120
Otros ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Pesticida detectado de otro grupo por tipo de pesticida ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	16	0.029	0.051	0.006	0.220
Clase Ib	Pesticidas altamente peligrosos por tipo de pesticida ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	1	0.021		0.021	0.021
Clase II	Pesticidas moderadamente peligrosos por tipo de pesticida ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	59	0.019	0.031	0.005	0.220
Clase III	Pesticidas ligeramente peligrosos por tipo de pesticida ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).	5	0.015	0.009	0.006	0.029



y tres paquetes (11.1 %) contenían tres pesticidas. Esta situación es consistente con situaciones similares en otros países latinoamericanos. Por ejemplo, en fincas de melón mexicanas sin una cadena comercial bien establecida, se encontró que los agricultores aplicaban en exceso el mismo pesticida o mezclaban hasta seis productos diferentes, lo que provocaba la acumulación de residuos tóxicos en la fruta, contaminación ambiental e intoxicación de agricultores (Vargas-González *et al.*, 2016). En otro estudio de Calderón *et al.* (2022), se evaluó la presencia de 22 residuos de pesticidas en vegetales vendidos en supermercados y ferias de agricultores de Chile y México, estimándose el riesgo de inocuidad en la dieta alimenticia. Se encontraron once pesticidas diferentes, incluidos carbofurano, clorpirifos, cipermetrina y lambda-cialotrina, en acelga, lechuga, chile verde, tomate y espinaca. El número total y las concentraciones de estos químicos fueron mayores en México (10) que en Chile (3). La lambda-cialotrina fue el residuo más común encontrado en todas las hortalizas chilenas y mexicanas. Los niveles de peligro de residuos de pesticidas (indicados por la OMS) detectados en las diversas marcas de quinua se muestran por grupo químico (Cuadro 3). Los paquetes que contenían principalmente pesticidas organofosforados (24 de 25 marcas), piretroides y otros químicos, en su mayoría pertenecen a la clasificación moderadamente peligrosa (Clase II). Solo uno de los agroquímicos detectados pertenecía a la clasificación de carbamatos, que se considera altamente peligroso.

**Table 3.** Clasificación de pesticidas: clasificación química vs. clasificación de la OMS de los identificados en muestras de quinua en mercados de Perú.

		Clasificación de la OMS			Total
		Altamente peligrosos (Clase I)	Moderadamente peligrosos (Clase II)	Ligeramente peligrosos (Clase III)	
Clasificación química	Organofosfato	0 (0.0 %)	24 (96.0 %)	1 (4.0 %)	25 (38.5 %)
	Carbamato	1 (100.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	1 (1.5 %)
	Piretroide	0 (0.0 %)	23 (100.0 %)	0 (0.0 %)	23 (35.4 %)
	Otros pesticidas	0 (0.0 %)	12 (75.0 %)	4 (25.0 %)	16 (24.6 %)
	Total	1 (1.5 %)	59 (90.8 %)	5 (7.7 %)	65 (100.0 %)

El clorpirifos y la cipermetrina mostraron la mayor incidencia de detección entre las muestras de quinua empacadas en el país, con presencia en 20 y 21 marcas de quinua, respectivamente (Cuadro 4). Si bien se sabe que el clorpirifos es conocido por ser efectivo contra varias plagas que atacan a los cereales, también se ha demostrado que representa un riesgo para la salud humana al afectar el hígado, el sistema nervioso central y los sistemas cardiovascular y respiratorio (Zacharia, 2011; Lozowicka *et al.*, 2014). De manera similar, la cipermetrina, pesticida sintético piretroide, es altamente tóxico para los peces y los insectos, incluidas las abejas. Sin embargo, se considera menos tóxico para mamíferos y aves (Abubakar *et al.*, 2020; Lozowicka *et al.*, 2014).

**Cuadro 4.** Residuos de pesticidas encontrados en paquetes de quinua en mercados de Perú.

Tipo de pesticida	Positivos encontrados (%)	LMR de la UE	Paquetes por encima del LMR de la UE (%)	Concentración mínima detectada (mg kg <sup>-1</sup> )	Concentración media detectada (mg kg <sup>-1</sup> )	Concentración máxima detectada (mg kg <sup>-1</sup> )	LDC* (mg kg <sup>-1</sup> )
Carbofurano	1 (3.7 %)	0.01	1 (3.7 %)	0.0210	0.0210	0.0210	<0.01
Clorpirifos	20 (74.1 %)	0.01	16 (59.3 %)	0.0053	0.0173	0.0650	<0.005
Malatión	1 (3.7 %)	8	0 (0.0 %)	0.0067	0.0067	0.0067	<0.005
Pirimifos-metil	4 (14.8 %)	0.5	0 (0.0 %)	0.0052	0.0118	0.0200	<0.005
Cipermetrina	21 (77.8 %)	0.3	0 (0.0 %)	0.0050	0.0152	0.1200	<0.005
Lambda-cihalotrina	2 (7.4 %)	0.021	1 (3.7 %)	0.0052	0.0131	0.0210	<0.005
Ácido 2,4-diclorofenoxiacético	1 (3.7 %)	0.05	0 (0.0 %)	0.0280	0.0280	0.0280	<0.01
Acetamiprid	2 (7.4 %)	0.01	2 (7.4 %)	0.0110	0.1155	0.2200	<0.01
Clotianidina	1 (3.7 %)	0.01	1 (3.7 %)	0.0210	0.0210	0.0210	<0.01
Dimetomorf	2 (7.4 %)	0.01	2 (7.4 %)	0.0150	0.0160	0.0170	<0.01
Fenamidona	1 (3.7 %)	0.01	0 (0.0 %)	0.0056	0.0056	0.0056	<0.005
Imidacloprid	4 (14.8 %)	0.023	1 (3.7 %)	0.0140	0.0180	0.0230	<0.01
Lufenurón	1 (3.7 %)	0.01	1 (3.7 %)	0.0290	0.0290	0.0290	<0.01
Pendimetalina	2 (7.4 %)	0.05	0 (0.0 %)	0.0072	0.0079	0.0085	<0.005
Tebuconazole	1 (3.7 %)	0.02	0 (0.0 %)	0.0100	0.0100	0.0100	<0.005
Tiametoxam	1 (3.7 %)	0.01	1 (3.7 %)	0.0180	0.0180	0.0180	<0.01

\*LDC = Límite de cuantificación.

Los resultados confirman la hipótesis de que existe presencia de pesticidas prohibidos internacionalmente en la quinua doméstica que consumieron los peruanos durante la pandemia del COVID-19. Se encontró que una muestra de quinua de producción nacional contenía carbofurano en un nivel que excedía el LMR de la UE. Aún más preocupante es que este producto de quinua en particular se comercializó como orgánico. El carbofurano es uno de los pesticidas más tóxicos dentro de los carbamatos (Vargas-González *et al.*, 2016) y está clasificado como pesticida altamente peligroso (Clase 1b) (OMS, 2020). Además, 16 de los 27 paquetes contenían niveles de clorpirifos que superaban el LMR de la UE. En el Cuadro 5 se muestran las propiedades químicas y toxicológicas de los pesticidas detectados en las 27 marcas de quinua que se evaluaron en este estudio.

Calderón *et al.* (2022) no encontraron rastros de carbofurano en muestras de acelgas de México, pero si en las de Chile. Cabe destacar que se detectaron residuos de carbofurano en acelga chilena, a pesar de que este pesticida está prohibido en el país. En particular, esto es preocupante porque representa una amenaza potencial para la salud de los grupos vulnerables de la sociedad. Del mismo modo, en un estudio realizado en España, los niveles de residuos de carbofurano, clorpirifos e imidacloprid, pesticidas prohibidos en la borraja, superaron los LMRs correspondientes en muestras tomadas de la comunidad autónoma de Aragón (Cantín-Galindo *et al.*, 2016). Es importante destacar que ninguno de esos pesticidas está actualmente prohibido en Perú. Los

**Cuadro 5.** Características químicas y toxicológicas de los pesticidas encontrados en las muestras de quinua expandidas en mercados de Perú.

Tipo de pesticida	Clasificación química	Clasificación de la OMS	Prohibido en la UE*	Lista de seguimiento de pesticidas**
Carbofurano	Carbamato	Clase Ib	S	Convenciones internacionales; toxicidad aguda; muy tóxico para las abejas
Clorpirifos	Organofosfato	Clase II	S	Muy tóxico para las abejas.
Malatión	Organofosfato	Clase III	S	Muy tóxico para las abejas.
Pirimifos-metil	Organofosfato	Clase II	S	Muy tóxico para las abejas.
Cipermetrina	Piretroide	Clase II	S	Muy tóxico para las abejas.
Lambda-cihalotrina	Piretroide	Clase II	CPS	H330 (letal en caso de inhalación); químico disruptor endocrino; muy tóxico para las abejas
Ácido 2,4-diclorofenoxiacético	Otros pesticidas: fenoxi (herbicida)	Clase II		Químico disruptor endocrino
Acetamiprid	Otros pesticidas: neonicotinoide (insecticida)	Clase II		Muy tóxico para las abejas.
Clotianidina	Otros pesticidas: neonicotinoide (insecticida)	Clase II	S	Muy tóxico para las abejas.
Dimetomorf	Otros pesticidas: morfolina (fungicida)	Clase III		Químico disruptor endocrino
Fenamidona	Otros pesticidas: imidazol (antifúngico)	Clase III	S	Químico disruptor endocrino; muy persistente en agua, suelo y sedimentos; muy tóxico para organismos acuáticos
Imidacloprid	Otros pesticidas: neonicotinoide (insecticida)	Clase II	S	Muy tóxico para las abejas.
Lufenurón	Otros pesticidas: benzoilureas (insecticida o acaricida)	Clase III	S	Muy bioacumulativo; muy persistente en agua, suelo y sedimentos; muy tóxico para organismos acuáticos; muy tóxico para las abejas
Pendimetalina	Otros pesticidas: dinitroanilinas (pesticida)	Clase II	CPS	Muy bioacumulativo; muy persistente en agua, suelo y sedimentos
Tebuconazole	Otros pesticidas: triazol (fungicida, mohos)	Clase II	CPS	H330 (letal en caso de inhalación); químico disruptor endocrino
Tiametoxam	Otros pesticidas: neonicotinoide (insecticida)	Clase II	S	Muy tóxico para las abejas.

S: Sí; CPS: candidato para sustitución. \*PAN (2021) (Red de Acción en Plaguicidas por sus siglas en inglés). \*Certificados UTZ (2021).

resultados también revelan que las muestras de quinua analizadas exhibieron un incumplimiento considerable de los LMRs para pesticidas establecidos por la UE. Se muestran los datos sobre pesticidas encontrados en paquetes de quinua convencional “vendida como orgánica” que excedieron los LMRs de la UE (Cuadro 6). En esta investigación, 59.3 % (16 paquetes) de las marcas de quinua analizadas que contenían el pesticida clorpirifos excedieron el LMR de la Unión Europea (UE). En contraste, un estudio de Lozowicka *et al.* (2014) descubrió residuos de clorpirifos-metilo por debajo del LMR en muestras de cereales en Kazajistán. Por otro lado, Calderón

**Cuadro 6.** Niveles de pesticidas que superaron los LMRs de la Unión Europea (UE) en las clasificaciones convencional y “vendido como orgánico” en mercados de Perú.

		Pesticidas por encima de los LMRs de la UE		Total
		No	Sí	
Clasificación: convencional vs. vendido como orgánico	Convencional	27 (57.4 %)	20 (42.6 %)	47 (72.3 %)
	Vendido como orgánico	12 (66.7 %)	6 (33.3 %)	18 (27.7 %)
	Total	39 (60.0 %)	26 (40.0 %)	65 (100.0 %)

*et al.* (2022) encontraron altos niveles de clorpirifos en espinacas mexicanas. La UE prohibió el uso de clorpirifos desde el 31 de enero de 2020. Mediante una votación del comité regulador el 6 de diciembre de 2019, respaldaron retirar la autorización para el clorpirifos y la sustancia relacionada clorpirifos-metilo en toda la UE (Bloomberg Law, 2019), que han sido identificados como una posible causa de daño neurológico en niños.

Además, de 16 pesticidas encontrados en 10 paquetes de quinua convencional “vendidos como orgánicos”, seis superaron los LMRs de la UE (cinco para clorpirifos y uno para carbofurano). En investigaciones previas sobre quinua peruana orgánica, Ortega *et al.* (2016) demostraron la presencia de dileno diclorodifenildicloroetano (p, p’-DDE) en niveles cinco veces superiores al LMR de referencia en dos muestras. Sin embargo, Calderón *et al.* (2022) informaron que las concentraciones medias de pesticidas en Chile no excedieron los LMRs. En México, nueve cultivos convencionales y cinco orgánicos tenían seis pesticidas que excedían los LMR de la UE. Además, Nguyen *et al.* (2022) descubrieron 18 sustancias prohibidas para la producción de arroz orgánico en diez distritos de seis provincias de la región del Delta del Mekong en Vietnam. Los pesticidas residuales en los cultivos de arroz fueron el resultado de: a) una violación de los procesos de producción orgánica, incluido el uso de pesticidas químicos por parte de los agricultores para controlar plagas y enfermedades, y b) los residuos de pesticidas que quedaron en el suelo de cultivos anteriores debido a la vida media de los mismos (es decir, el tiempo necesario para que se reduzcan en un 50 %). Una razón posible para las altas concentraciones de residuos de agrotóxicos en los cultivos orgánicos podría deberse al uso ilegal de pesticidas (Food Fraud Advisors, 2020). Ortega *et al.* (2016) propusieron que pudiera ocurrir una contaminación cruzada entre la agricultura orgánica y la convencional, ya que con frecuencia se cultivan en terrenos adyacentes. Pero también encontraron que los cultivos orgánicos tienen menor incidencia de residuos de agroquímicos que los cultivos convencionales. En esta investigación se constató que la quinua peruana contiene residuos de pesticidas prohibidos con niveles que superan los LMR europeos, incluso en la quinua orgánica. Estos hallazgos son cruciales para comprender los tipos de agroquímicos y los niveles de residuos presentes en la quinua que se vende en supermercados y

ecomercados en Lima, Perú. Es fundamental señalar que el uso de pesticidas sintéticos en la agricultura no solo afecta el medio ambiente, también representa una amenaza para la salud humana (UCSD, 2021; Ortega *et al.*, 2016). La exposición a estos químicos provoca efectos agudos a corto o largo plazo en la salud humana, particularmente en los sistemas reproductivo, endócrino y nervioso central (UCSD, 2021). Además, los pesticidas tienen tres efectos nocivos: efectos agudos, efectos alérgicos y efectos retardados, como el cáncer. Por lo tanto, es crucial reducir el uso de agrotóxicos peligrosos para evitar daños a la salud de los trabajadores agrícolas, sus familias y los consumidores de quinua.

Si bien es poco realista eliminar el uso de pesticidas en toda la producción de cultivo, las autoridades estadounidenses han identificado y denunciado numerosos químicos ilegales en los alimentos desde 2014. Este tipo de residuos fueron los responsables del rechazo de las exportaciones de quinua peruana en puertos de los Estados Unidos, según lo informado por la FDA (2023). Nuestro estudio reveló que una cantidad significativa de pesticidas utilizados en la producción de quinua peruana están prohibidos en la UE, con nueve de los 16 pesticidas prohibidos y tres categorizados como candidatos de sustitución (CDS) (Cuadro 5). Estos hallazgos se alinean con la revisión de Li *et al.* (2021), quienes demostraron que seis frutas y verduras con alta toxicidad y pesticidas agregados ilegalmente eran apio (28 tipos), manzana (26 tipos), espinaca (25 tipos), cebollino (24 tipos), lechuga (23 tipos) y pepino (22 tipos). Las tasas de detección de los pesticidas altamente tóxicos diclorvos y carbofurano fueron más altas.

Según los residuos detectados en las muestras analizadas en esta investigación, es evidente que la quinua nacional peruana representa un riesgo significativo para la salud de los consumidores, ya que el nivel de toxicidad se considera inaceptable y puede tener consecuencias agudas o crónicas para la salud de los seres humanos. Los consumidores nacionales corren un mayor riesgo, ya que los controles para el consumo interno son menos estrictos en comparación con los de los productos exportados (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018). El organismo nacional responsable de los estándares de seguridad agrícola en Perú (SENASA) carece de un plan de acción para enfrentar la detección de pesticidas prohibidos en alimentos y no ha establecido acciones o sanciones cuando los residuos químicos o contaminantes superan los niveles permisibles (SENASA, 2014; 2017).

También es evidente la falta de monitoreo por parte del gobierno peruano en las normas internas de seguridad e inocuidad alimentaria, lo que alienta a los productores a usar pesticidas no aprobados con dosis e intervalos de seguridad inapropiadas (Vargas-González *et al.*, 2016). Además, la falta de protección al consumidor y de información disponible para las compras diarias en los mercados peruanos (Delgado-Zegarra *et al.*, 2018) resulta en el consumo de productos agrícolas altamente contaminados con pesticidas peligrosos, que no cumplen con los estándares de la UE. En particular, este problema fue crítico durante la pandemia del COVID-19, donde fue crucial la necesidad de alimentos nutritivos para mantener una alta inmunidad entre la población peruana.

Por tanto, existe una necesidad apremiante de programas de monitoreo continuo y regulaciones más estrictas para todos los productos agrícolas, no solo la quinua, con el fin de promover la seguridad e inocuidad alimentaria y mejorar la salud pública en Perú.

En este contexto, el gobierno peruano debe incentivar el uso de alternativas de control fitosanitario para reducir la dependencia de pesticidas sintéticos en los sistemas de producción. El gobierno nacional también debe hacer cumplir regulaciones estrictas que controlen el uso adecuado de agroquímicos en las regiones agrícolas, aplicar estándares internos de LMR a los productos nacionales y prohibir el uso de pesticidas altamente tóxicos (Vargas-González *et al.*, 2016). Es fundamental realizar estudios epidemiológicos que demuestren los efectos perjudiciales de los pesticidas en la salud de los trabajadores agrícolas y el medio ambiente. Además, se necesitan modificaciones urgentes a la normativa vigente para implementar programas de capacitación, tanto para los agricultores industriales como para los pequeños agricultores. SENASA debe establecer mecanismos de cumplimiento para monitorear a los distribuidores de pesticidas y agricultores que carecen de experiencia técnica en el uso de pesticidas. Instituciones como las cooperativas también deberían tomar medidas adicionales para actuar como verificadores de facto y aumentar el control sobre las prácticas de sus socios agricultores.

Para proteger los cultivos, en particular los cereales como la quinua, se deben tomar medidas preventivas tanto en los campos como en las instalaciones de almacenamiento. La forma más efectiva de llevar a cabo el control de plagas es a través de la prevención, como plantar semillas certificadas o usar variedades resistentes a plagas, evitando el monocultivo, adhiriéndose a los principios del manejo integrado de plagas al integrar el sistema de alerta de plagas, rotando y asociando plantas y evitando el exceso de humedad e inundaciones (Bastantes-Morales *et al.*, 2019). El nivel de residuos peligrosos en los productos fitosanitarios no debe superar los LMRs, tal y como señalan Lozowicka *et al.* (2014). Las autoridades peruanas podrían adoptar la Política Agrícola Común (PAC) de la Unión Europea como la técnica más adecuada para producir alimentos sanos y nutritivos tanto para la exportación como para el consumo interno (Bastantes-Morales *et al.*, 2019).

Finalmente, los consumidores peruanos deben exigir que el gobierno priorice la seguridad e inocuidad alimentaria y establezca regulaciones claras que destaquen las implicaciones éticas y sociales del control de la inocuidad alimentaria a nivel nacional. La autoridad nacional de protección al consumidor de Perú (INDECOPI) también debería imponer sanciones a las empresas que incumplan los derechos de seguridad e inocuidad alimentaria de los consumidores, en particular en lo que respecta al uso excesivo de pesticidas.

## CONCLUSIONES

Este estudio revela que la quinua en Perú contiene pesticidas prohibidos internacionalmente, incluso en niveles que exceden los Límites Máximos de Residuos europeos. El hallazgo es preocupante, ya que consumir quinua con residuos de

pesticidas aumenta el riesgo de efectos nocivos para la salud, en particular para las poblaciones vulnerables, como niños y ancianos, lo cual ha sido determinante para enfrentar con éxito los efectos de la pandemia por COVID-19.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por un proyecto interno anual 2020 promovido por la vicerrectoría de investigación de la Universidad del Pacífico (Lima, Perú). Un agradecimiento especial a Ivan Huby, José Vinicius da Silva y Sue Jessop por su experiencia técnica y conocimiento en las diferentes etapas de esta investigación.

### LITERATURA

- Abubakar Y, Tijjani H, Egbuna C, Oluwaseun Adetunji C, Kala S, Kryeziu TL, Ifemeje JC, Patrick-Iwuanyanwu KC. 2020. Pesticides, history, and classification. *In* Natural remedies for pest, disease and weed control; Egbuna C, Sawicka B. (eds.). Academic Press: London, UK. pp: 29–42. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04523-5>
- Bastantes-Morales ER, Alconada MM, Pantoja JL. 2019. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) production in the Andean Region: challenges and potentials. *Journal of Experimental Agriculture International* 36 (6): 1–18. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v36i630251>
- Bloomberg Law. 2019. EU to ban chlorpyrifos pesticide starting in February. December 6, 2019. <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/eu-to-ban-chlorpyrifos-pesticide-starting-in-february> (Recuperado: marzo 2021).
- Calderón R, García-Hernández J, Palma P, Leyva-Morales JB, Zambrano-Soria M, Bastidas-Bastidas PJ, Godoy M. 2022. Assessment of pesticide residues in vegetables commonly consumed in Chile and Mexico: Potential impacts for public health. *Journal of Food Composition and Analysis* 108: 104420. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104420>
- Cantín-Galindo S, Herrero-Mambrona P, Carcas de Benavides MC, Roca-Vela MA, Frutos-Surrio A. 2016. Investigación de residuos de plaguicidas en frutas, verduras y hortalizas y cereales en la Comunidad Autónoma de Aragón durante el periodo 2010-2013. *Revista de Toxicología* 33 (1): 44–49.
- Delgado-Zegarra J, Alvarez-Risco A, Yáñez JA. 2018. Uso indiscriminado de pesticidas y ausencia de control sanitario para el Mercado interno en Perú. *Revista Panamericana de Salud Pública* 42: 1–6. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2018.3>
- European Commission. 2021. Pesticide Residues, EU Pesticides Database. Directorate-General for Health and Food Safety. European Commission. Brussel, Belgium. [https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database\\_en](https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en) (Recuperado: diciembre 2021).
- FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2023. Import alert 99-08: Detection without physical examination of processed human and animal foods for pesticides. Silver Spring, MD, USA. [https://www.accessdata.fda.gov/cms\\_ia/importalert\\_259.html](https://www.accessdata.fda.gov/cms_ia/importalert_259.html) (Recuperado: febrero 2023).
- Food Fraud Advisors. 2020. Organic food fraud in 2020. August 8, 2020. <https://www.foodfraudadvisors.com/organic-food-fraud-in-2020/> (Recuperado: mayo 2021).
- de O Gomes H, Menezes JMC, da Costa JGM, Coutinho HDM, Teixeira RNP, do Nascimento RF. 2020. A socio-environmental perspective on pesticide use and food production. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 197 (1): 110627 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110627>
- Li C, Zhu H, Li C, Qian H, Yao W, Guo Y. 2021. The present situation of pesticide residues in China and their removal and transformation during food processing. *Food Chemistry* 354: 129552. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129552>
- Lozowicka B, Kaczynski P, Paritova AE, Kuzembekova GB, Abzhaliyeva AB, Sarsembayeva NB, Alihan K. 2014. Pesticide residues in grain from Kazakhstan and potential health risks associated with exposure to detected pesticides. *Food and Chemical Toxicology* 64: 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.11.038>
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2017. La quinua: Producción y comercio del Perú. Boletín perfil técnico No. 2. Ministerio de Agricultura y Riego, Dirección General

- de Políticas Agrarias. Lima, Perú. <https://docplayer.es/49009848-La-quinua-produccion-y-comercio-del-peru-perfil-tecnico-n-o-2-direccion-general-de-politicas-agrarias-boletin.html> (Recuperado: febrero 2021).
- Nguyen CT, Vo TT, Nguyen TX, Nguyen HP, Bui DD, Nguyen VM, Duong VH. 2022. Assessment of pesticide residues in organic rice production in the Mekong Delta, Vietnam. *European Journal of Development Studies* 2 (3): 1–11. <https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2022.2.3.95>
- Nolte GE. 2014. Quinoa Outlook Peru. USDA Foreign Agricultural Service. Lima, Perú. [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Quinoa%20Outlook\\_Lima\\_Peru\\_12-12-2014.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Quinoa%20Outlook_Lima_Peru_12-12-2014.pdf) (Recuperado: febrero 2021).
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2020) Clasificación recomendada por la OMS de los plaguicidas por el peligro que presentan y directrices para la clasificación 2019. Ginebra, Suiza. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240005662> (Recuperado: marzo 2023).
- Ortega RE, Zamalloa WA, Tornisielo VL, Zirena F. 2016. Determination of organochlorine pesticides in organic quinoa grains (*Chenopodium quinoa* Willd) by GC- $\mu$ ECD, using the QuEChERS method. *Revista Investigaciones Altoandinas* 18 (1): 19–26.
- PAN (Pesticide Action Network International). 2021. PAN International List of Highly hazardous Pesticides (HHPs). Hamburg, Germany. [https://pan-international.org/wp-content/uploads/PAN\\_HHP\\_List.pdf](https://pan-international.org/wp-content/uploads/PAN_HHP_List.pdf) (Recuperado: diciembre 2022)
- SENASA (Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú). 2014. Informe del monitoreo de residuos químicos y otros contaminantes en granos de quinua (*Chenopodium quinoa*), año 2014. <https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/2016/12/Informe-del-Monitoreo-de-Residuos-Químicos-y-otros-Contaminantes-en-granos-de-quinua-Chenopodium-quinua-año-2014-1.pdf> (Recuperado: febrero 2021).
- SENASA (Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú). 2017. Informe del monitoreo de residuos químicos y otros contaminantes en alimentos agropecuarios primarios, año 2017. Ministerio de Agricultura y Riego, Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú, Dirección de Insumos Agropecuarios e Inocuidad Agroalimentaria. Lima, Perú. <https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/2018/12/INFORME-FINAL-DEL-PLAN-DE-MONITOREO-2017-1.pdf> (Recuperado: febrero 2021).
- Sierra y Selva Exportadora. 2020. Análisis de Mercado Quinoa 2015–2020. Ministerio de Agricultura y Riego, Sierra y Selva Exportadora. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/sse/informes-publicaciones/1420442-analisis-de-mercado-quinua-2015-2020> (Recuperado: julio 2021).
- UCSD (University of California San Diego). 2021. Synthetic Pesticides. San Diego, CA, USA. [http://www.bt.ucsd.edu/synthetic\\_pesticide.html](http://www.bt.ucsd.edu/synthetic_pesticide.html) (Recuperado: diciembre 2021).
- UTZ Certified. 2015. List of Banned Pesticides and Pesticides Watchlist. Standard and Certification Department. Amsterdam, Netherlands. <https://docplayer.net/5254340-List-of-banned-pesticides-and-pesticides-watchlist-version-1-0.html> (Recuperado: diciembre 2021).
- Vargas-González G, Alvarez-Reyna V, Guigón-López C, Cano-Ríos P, Jiménez-Díaz F, Vásquez-Arroyo J, García-Carrillo M. 2016. Patrón de uso de pesticidas de alto riesgo en el cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) en la Comarca Lagunera. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3 (9): 367–378.
- WHO (World Health Organization). 2019. The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2019. Geneva, Switzerland. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240005662> (Recuperado: marzo 2021).
- Zacharia JT. 2011. Identity, physical and chemical properties of pesticides. *In* Pesticides in the modern world - trends in pesticides analysis; Stoytcheva M. (ed.). InTech: London, UK, pp: 1–20. <https://doi.org/10.5772/17513>

## TRADITIONAL AND UPDATED EVALUATION OF THE RANGELAND SITE AND CONDITION IN THE SEMIARID SCRUB OF THE HIGH PLATEAU

Juan Rogelio Aguirre-Rivera<sup>1</sup>, Luis Octavio Negrete-Sánchez<sup>1\*</sup>, Rigoberto Castro-Rivera<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Altair No. 200, Col. del Llano, San Luis Potosí, San Luis Potosí, Mexico. C. P. 78377.

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5, Santa Inés Tecuexcomac, Tlaxcala, Mexico. C. P. 90700.

\* Author for correspondence: luis.negrete@uaslp.mx

### ABSTRACT

In Mexico, the concepts of rangeland site and condition are not well known. For this reason, most of the rangelands of private ranches on the high plateau of San Luis Potosí and Zacatecas are undergoing a process of severe generalized deterioration. The purpose of this study was to survey and characterize multi-branched rangeland sites of three beef cattle ranches on the San Luis Potosí-Zacatecas High Plateau, as well as to assess their condition using a quantitative ecological method complemented by updated technological tools. The hypothesis proposed was that the site and condition of rangeland evaluated with the quantitative ecological method (used for grasslands and soil), complemented by updated technology, are also identifiable in multi-branched rangelands of this type of production units on the San Luis Potosí-Zacatecas High Plateau. Based on a Landsat satellite image, an unsupervised classification process was performed for the three ranches, which was then confirmed by field observations. A total of 11 sites were surveyed, three on each ranch (microphyll desert scrub, predominantly *Bouteloua gracilis*; microphyll desert scrub, with predominance of *Sporobolus airoides*; and an ecotone between microphyll desert scrub and rosetophile desert scrub) and two exclusive locations (crassicaule scrub and rosetophile desert scrub with predominance of *Muhlenbergia villiflora*). Rangeland condition was evaluated by measuring density and volume (volumetric biomass) of the main plant species, categorized by forage value, and the actual state of the soil surface was assessed in terms of bare soil and vegetation, litter, feces and rock cover. The data were ordered and classified with the DECORANA and TWINSPAN modules from the PC-ORD program. Site and condition evaluation under this approach was satisfactory for surveying the state of the rangelands of the three private cattle ranches studied on the San Luis Potosí-Zacatecas High Plateau.

**Keywords:** multivariate analysis, cattle in scrub vegetation, supervised classification, soil cover, rangeland site.

**Citation:** Aguirre-Rivera JR, Negrete-Sánchez LO, Castro-Rivera R. 2023. Traditional and updated evaluation of the rangeland site and condition in the semiarid scrub of the high plateau. *Agrociencia* 57(3): 589-621. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2620>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: February 18, 2022.  
Approved: February 08, 2023.  
**Published in Agrociencia:**  
March 30, 2023.

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



## INTRODUCTION

Half of the world's land area is covered by rangeland (Holechek *et al.*, 2011). In San Luis Potosí, more than 1.6 million ha are designated as rangeland (INEGI, 2007), which is mainly used for grazing livestock that feed on spontaneous vegetation (CONAZA, 1994). Grazing causes alterations in the vegetation, similar to those caused by other human activities (Lasanta, 2010). Rangelands are a natural resource that, when used rationally, can be productive and environmentally stable indefinitely (Holechek, 1991). However, rangeland abuse on the High Plateau in the states of San Luis Potosí and Zacatecas, Mexico, is evident, and the death of the livestock that occurs during droughts is, to date, the only remedy for their seasonal recovery. Therefore, the derived unconscious process of desertification occurs and is generalized while the organic production potential of these lands decreases gradually and irreversibly (Negrete-Sánchez *et al.*, 2016).

Currently, extensive grazing on rangelands is the primary mode of beef production (Ruechel, 2012). Techniques for evaluating the potential, condition, and trend of rangelands, whose definition and procedure were developed during the first half of the last century, particularly for the climactic grasslands of North America, have been developed for the use of rangelands with an ecological basis. (Dyksterhuis, 1949). Holechek *et al.* (2011) defined a rangeland site as a landscape unit resulting from the combination of biotic and abiotic factors of the environment, which together determine primary production.

The condition of a rangeland is estimated to characterize the actual state of its botanical composition in relation to climax vegetation. Under this approach, it is classified into four categories: poor, regular, good, and excellent, depending on the relative importance of the species present, their forage value, and their response to grazing (Dyksterhuis, 1949). Humphrey (1949) defined condition as the amount of forage produced in relation to the site's maximum potential. However, Holechek *et al.* (2011) proposed that rangeland site condition should be determined by combining structural and functional vegetation and soil state or cover variables. The trend of the rangeland is the probable direction of the condition based on the succession of species, which can determine a progressive change toward improvement of the rangeland, regression because of deterioration, stability if no change is reflected, or divergence if one part improves but another regresses. This methodology has been applied to all public and private grass-covered rangelands in the southwestern USA (USDA, 2013). In Mexico, only in the 1960s was an attempt made to apply these rangeland evaluation techniques to other vegetation types, ranging from grasslands to scrub vegetation, forests, and jungles (COTECOCA, 1974). Although current mean stocking rates on most of the private ranches in Mexico can be considered excessive, some ranchers maintain moderate rates with relevant results in terms of reproduction and production indicators of their herds (CONAZA, 1994). On some of these ranches there are visual differences, from subtle to marked (Figure 1), in the vegetation structure and state of the soil surface.



**Figure 1.** A: private rangeland, Rancho San José, Villa de Cos, Zacatecas, in good condition, a microphyll desert scrub site with *Sporobolus airoides* dominance; B: communal rangeland, ejido Noria de Gutiérrez, Charcas, San Luis Potosí, in poor condition (image captured with a drone on October 6th, 2022, during the wet season of the year).

The virtues of multivariate analysis for rangeland classification using condition gradients were highlighted by Bolaños-Medina and Aguirre-Rivera (2000) and Aguirre-Rivera *et al.* (2020). Although this technique has received little attention in rangeland research, it has been used in other studies to identify gradients of morphological variations in domesticated prickly pear by Reyes-Agüero *et al.* (2005) and in the *Salmianae* group of the *Agave* genus by Mora-López *et al.* (2011). Regarding

the use of satellite images, Medina *et al.* (2009) and Easdale *et al.* (2019) used SPOT and VANT images to identify rangeland sites to estimate forage production by means of an unsupervised classification process and a normalized difference vegetation index, respectively.

Based on the above, the objective of this study was to apply published local information to distinguish and characterize multi-branched rangeland sites (comprising herbs, grasses, and woody plants) and to evaluate their condition using the quantitative ecological method complemented by updated technological tools on three beef cattle ranches on the High Plateau in the states of San Luis Potosí and Zacatecas. The postulated hypothesis was that the sites and conditions of the rangeland evaluated by the quantitative ecological method (used for grasslands and soil), complemented with updated technology, are also identifiable in the multi-branched rangelands of private ranches on the San Luis Potosí-Zacatecas High Plateau.

## MATERIALS AND METHODS

### General aspects of the studied ranches

The three privately owned ranches found in the states of San Luis Potosí and Zacatecas in the southern part of the Chihuahuan Desert are part of the geomorphological region known as the Northern Mexican Highplain (Tamayo, 2012). These ranches have deep wells, pumps, and water reservoirs (runoff deposits), with which they have established networks of watering holes. They also have roads, handling corrals, border fences and paddocks, salt blocks, etc. The physical description of the study area is based on INEGI (2017) thematic maps. The geological substrate in San José (SJ) and El Porvenir (EP) is Quaternary, Tertiary, and Lower Cretaceous sedimentary rock. Laguna Seca (LS) also has a Triassic shale-sandstone sedimentary substrate and Tertiary acid extrusive igneous rock tuffs.

All three ranches are located in the hydrologic region “El Salado”. The dominant soil in the three ranches is Haplic xerosol, and the secondary soil is lithosol, of medium texture in the petrocalcic phase. In LS there are also rendzinas, lithosols, and calcaric regosols of medium texture in the lithic phase, while in SJ there are calcaric regosols and lithosols of medium texture in the lithic phase. The climate in LS is  $BS_0kw(x')$ , while in SJ and EP it is  $BS_0kw$ . The dry season in the three ranches lasts approximately seven months (SMN, 2021). The vegetation types present in the three ranches are microphyll desert scrub and, in a smaller proportion, rosetophile desert scrub. Moreover, in LS there are areas with crassicaule scrub in the igneous outcrops.

### Characterization of the vegetation

Based on LANDSAT satellite images from February 2017, unsupervised classification in ARC GIS® v.10 began in September of the same year, with five classes of cover, to identify the different types of vegetation that exist on each of the three ranches. Later, variants of the vegetation of interest to the study were identified in the field. Two of the cover classes in each ranch were discarded since one was rosetophile desert scrub

in steep mountainous areas inaccessible for cattle and the other included areas with bare soil (roads).

On the three ranches, there were three corresponding vegetation variants: the ecotone between microphyll desert scrub and rosetophile desert scrub (*MDS-RDS*), and two variants of microphyll desert scrub, one with a predominance of *Bouteloua gracilis* (*MDSBG*) and the other with a predominance of *Sporobolus airoides* (*MDSSA*). Moreover, in EP there was another variant of microphyll desert scrub with a predominance of *Muhlenbergia villiflora* (*MDSMV*), and only in LS was crassicaule scrub (*CS*) recorded. These vegetation types and characteristics of the Chihuahuan Desert can be considered rangeland sites, according to the corresponding definition (Holechek *et al.*, 2011). In each of the 11 sites, perennial species were collected. Although they were part of the initial serial states, annual species were discarded because they lack significant effects on rangeland productivity since their presence is ephemeral. The collected specimens were identified and deposited in the herbarium Isidro Palacios (SLPM) of the Desert Zones Research Institute of the *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.

#### Structural measurements of the vegetation

The thematic maps and plots generated with unsupervised classification, together with field observations in August and September 2018 (second half of the rainy, or growing, season), enabled the placement of two sampling areas in each of the surveyed rangeland sites. The method of quadrants without plots centered on points along transects (Cottam and Curtis, 1956) was used with the adequacy developed by Aldrete-Menchaca and Aguirre-Rivera (1982) for use in multi-stratified vegetation. The transects were defined with a 100 m long nylon cord stretched between steel stakes. The location of the transects was always at least 50 m from any fence, in the central part of the physiognomy of the surveyed site, and perpendicular to the slope. The initial and final points of each transect were georeferenced to make later evaluations possible. At every 20 m of the transect, a 10 m cord was installed perpendicularly to form four quadrants.

Before starting the measurements, the transect surroundings were searched for specimens, and a list of the most abundant perennial plant species in each of the four strata surveyed in these scrub vegetations was made: herbaceous, low shrubs, tall shrubs, and arborescent plants. The rest of the perennial species observed in the rangeland were recorded and collected to include them in a complete botanical list. In each quadrant, the distance from the point on the transect to the base of the closest plant was measured, and besides its species and distance, its basal diameter, upper diameter, and height were registered. This process was carried out in sequence by stratum, beginning with the herbaceous stratum, which was the densest and most susceptible to damage from trampling, and followed by each of the remaining strata. For tussocky plants clumped in colonies, the distance from the point to the center of the set was measured, and for the rest of the plants, the distance to the basal part closest to the transect point was measured (Aldrete-Menchaca and Aguirre-Rivera, 1982). In

the case of very large izotes, mesquites, and huisaches, height was determined with a clinometer. The plant species sampled were classified as desirable, less desirable, and undesirable based on their forage value and successional response to grazing. (Valentine, 1990). To calculate the density of each species, the reciprocal of the square of the mean distance of the species (measured area of the species) with the following formula:

$$\text{Density of species } i = \frac{\text{unit of area}}{\text{mean distance}^2 \text{ of species } i}$$

where the term 'unit of area' is the area of reference to express the density in the same units as the mean area of the species.

To estimate instantaneous biomass volume of each individual, the formula of the inverted truncated cone was used:

$$V = 1/3 \pi h (R^2 + r^2 + Rr)$$

where  $\pi = 3.1416$ ;  $h$ = height or distance between the two radii;  $R$ = top or expansion radius, and  $r$ = basal radius.

#### State of the soil surface

The state of the soil surface in each survey was estimated using five Canfield interception lines (Canfield, 1941), each one 5 m long, installed parallel and alternately to the main transect. The beginning and ends of these lines were also georeferenced. Along these lines, portions of bare soil and those with vegetation cover, litter, rocks, or feces were measured. The mean values of these components expressed in centimeters were summarized and arranged in tabular form.

With the data on vegetation and soil cover (13 variables) of the 11 rangeland sites studied on the three ranches, a 13 x 11 matrix was formed (Table 1), with which multivariate analysis programs were processed with PC-ORD v. 6 software (McCune and Mefford, 2011), specifically with the DECORANA (Detrended Correspondence Analysis) module to order vegetation and soil variables and with TWINSpan (Two-way indicator species analysis) to classify the rangeland sites.

### RESULTS AND DISCUSSION

Part of the method used in this study to determine rangeland condition coincides with that used by Contreras *et al.* (2003), who used Canfield lines to evaluate the condition of the communal rangelands of Yanhuitlán, Oaxaca. Also, some of the variables evaluated in our study coincide with those applied by Solomon *et al.* (2007) in their study of the perception of degradation of the rangelands in southern Borana, Ethiopia; the principal indicators of deterioration were a decrease in abundance of desirable Poaceae, an increase in undesirable woody species, and an increase in the portion of bare soil.

**Table 1.** Variables included in the multivariate analysis of the studied rangeland.

Variable	Acronym
Total perennial species measured	TOTAESPE
Total perennial species present	TOTESPRE
Density of desirable species	DENSDESE
Density of less desirable species	DENSMENO
Density of undesirable species	DENSINDE
Biomass of desirable species	BIOMDESE
Biomass of less desirable species	BIOMMENO
Biomass of undesirable species	BIOMINDE
Bare soil	SUELDESN
Soil covered with litter	SUELMANT
Soil covered with vegetation	SUELVEGE
Soil covered with feces	SUELHECE
Soil covered with rocks	SUELPIED
Ecotone MDS-RDA Laguna Seca	LSMDMMDR
Ecotone MDA-RDA San José	SJMDMMDR
Ecotone MDS-RDS El Porvenir	EPMDMMDR
MDS with predominance of <i>Bouteloua gracilis</i> San José	SJMDMBG
MDS with predominance of <i>Bouteloua gracilis</i> El Porvenir	EPMDMBG
MDS with predominance of <i>Bouteloua gracilis</i> Laguna Seca	LSMDMBG
MDS with predominance of <i>Muhlenbergia villiflora</i> El Porvenir	EPMDMMV
MDS with predominance of <i>Sporobolus airoides</i> Laguna Seca	LSMDMSA
MDS with predominance of <i>Sporobolus airoides</i> San José	SJMDMSA
MDS with predominance of <i>Sporobolus airoides</i> El Porvenir	EPMDMSA
CS Laguna Seca	LSMATCRA

Lara-Juárez *et al.* (2016) used the same technique to evaluate rangeland condition in another study to determine the relationship between rangeland condition and the presence of escamole ant nests (*Liometopum apiculatum*) in a rangeland shared by a private ranch and an adjacent ejido in Charcas, San Luis Potosí, although they only classified rangeland condition qualitatively as better, worse, and intermediate. Mellink and Valenzuela (1995) used the concept of rangeland condition qualitatively as well, categorizing their findings as better or worse.

#### Characterization of vegetation

The density (individuals ha<sup>-1</sup>) and instantaneous biomass volume (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) of the main perennial species were estimated in four rangeland sites: LS (with 112 sampling points), SJ (with 120 sampling points), and EP (with 108 sampling points), for a total of 340 sampling points, equivalent to 1360 quadrants and 3996 individuals of plant species measured. During the study survey, 12 preponderant species were measured and identified in LS, 16 in SJ, and 12 in EP (Table 2). Moreover, outside the sampled areas, another 36 perennial species were observed in LS, 25 in SJ, and 28 in EP, to complete a floristic list: 48 perennial species in LS, 41 in SJ, and 40 in EP.

**Table 2.** Species recorded and their forage value in the rangeland sites studied on the Laguna Seca (1), San José (2) and El Porvenir (3) ranches.

Species	Stratum <sup>†</sup>				VF <sup>‡</sup>	Ranch
	A	B	C	D		
<i>Acacia schaffneri</i> (S. Watson) F.J. Herm.				x	M	1, 2
<i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm.			x		M	1
<i>Bouteloua curtispindula</i> (Michx.) Torr.	x				D	1
<i>Bouteloua gracilis</i> (Willd. ex Kunth) Lag. ex Griffiths	x				D	1, 2, 3
<i>Calliandra eriophylla</i> Benth		x			D	1
<i>Celtis pallida</i> Torrey			x		I	1
<i>Condalia mexicana</i> Schlttdl.			x		I	2
<i>Cylindropuntia imbricata</i> (Haw.) F.M. Knuth			x		I	2
<i>Dalea bicolor</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.		x			D	1
<i>Dasyochloa pulchella</i> (Kunth) Willd. ex Rydb.	x				M	2, 3
<i>Erioneuron avenaceum</i> (Kunth) Tateoka	x				D	3
<i>Flourensia cernua</i> DC.			x		I	3
<i>Larrea tridentata</i> (Sessé & Moc. ex DC.) Cov.			x		I	1, 2, 3
<i>Lycurus phleoides</i> Kunth	x				M	1
<i>Mimosa biuncifera</i> Benth			x		I	2
<i>Muhlenbergia villiflora</i> Hitchc.	x				D	3
<i>Opuntia cantabrigiensis</i> Lynch			x		M	1, 2, 3
<i>Opuntia rastrera</i> F.A.C.Weber		x			M	1, 2, 3
<i>Parthenium argentatum</i> A. Gray		x			D	2, 3
<i>Parthenium incanum</i> Kunth		x			D	3
<i>Sporobolus airoides</i> (Torrey) Torrey	x				D	1, 2, 3
<i>Yucca filifera</i> Chabaud				x	M	2, 3

<sup>†</sup>Strata: A: herbaceous; B: low shrubs; C: tall shrubs, D: arborescent. <sup>‡</sup>Forage value for cattle. D: desirable; M: less desirable; I: undesirable.

The total floristic composition recorded on the three ranches of this study (Table 2) was generally qualitatively and quantitatively similar to that described by diverse authors for the vegetation in analogous environmental conditions (Rzedowski 1957; Bikila and Tessema, 2017; Aguirre-Rivera *et al.*, 2020). Pinos-Rodríguez *et al.* (2013) also recorded 38 species consumed by goats in communal rangelands of Villa de Guadalupe, San Luis Potosí, while Lara-Juárez *et al.* (2016), in their study of escamole ants, found 35 species in the “Siete Vueltas” paddock of the LS ranch and only 22 in the ejido Francisco I. Madero. The two properties were separated by a borderline fence and shared the same rangeland sites, and sampling was based on the same sample size. The difference observed was an indicator of the degradation of communal rangelands due to severe generalized overgrazing with no individual limits on stocking rate (Lara-Juárez *et al.*, 2016; Negrete-Sánchez *et al.*, 2016), as compared with private ranches where the owners can more easily make decisions to adjust stocking rate and spatial distribution.

### Differences in vegetation structure caused by paddock use patterns in the same rangeland site

Unlike other studies that evaluated rangelands but did not indicate the vegetation classes found (Contreras *et al.*, 2003; Solomon *et al.*, 2007; Bikila and Tessema, 2017), in our study, we described in detail the rangeland sites present on the three ranches to evaluate and determine their condition.

The three ranches have three coinciding rangeland sites: *MDS-RDS*, *MDSBG*, and *MDSSA*; moreover, in LS, we registered CS and *MDSMV* in EP (Table 3). When the condition of the identified rangeland sites was considered, the results were particularly different. In LS, density and biomass of desirable species were significantly higher in two (*MDS-RDS* and *MDSBG*) of the three rangeland sites shared by the three ranches; this was more pronounced with density values than with biomass values. The opposite occurred in the third common rangeland site (*MDSSA*), as the lowest values were

**Table 3.** Density (thousands of individuals ha<sup>-1</sup>) and mean weighted biomass volume (thousands of m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) of the species grouped according to their forage value on the three studied ranches<sup>†</sup>.

Site	Forage value	Density			Biomass		
		LS	SJ	EP	LS	SJ	EP
<i>MDS-RDS</i>							
	<i>Desirable</i>	456.9	13.3	25.4	1.9	0.2	1.6
	<i>Less desirable</i>	2.4	25.3	15.6	4.8	2.0	0.1
	<i>Undesirable</i>	1.0	3.7	0.5	0.7	1.0	0.1
	Total	460.3	42.3	41.5	7.4	3.2	1.8
<i>MDSBG</i>							
	<i>Desirable</i>	160.9	31.8	36.7	7.3	1.5	0.3
	<i>Less desirable</i>	1.5	35.5	0.0	1.0	1.8	0.0
	<i>Undesirable</i>	1.7	1.6	2.9	1.6	1.0	2.5
	Total	164.1	68.9	39.6	9.9	4.3	2.8
<i>MDSSA</i>							
	<i>Desirable</i>	4.0	35.0	313.0	2.0	2.4	30.7
	<i>Less desirable</i>	0.8	86.0	43.2	3.9	0.7	3.4
	<i>Undesirable</i>	0.0	1.1	7.8	0.0	0.9	2.9
	Total	4.8	122.1	364.0	5.9	4.0	37.0
CS							
	<i>Desirable</i>	741.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0
	<i>Less desirable</i>	0.7	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0
	<i>Undesirable</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Total	741.7	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0
<i>MDSMV</i>							
	<i>Desirable</i>	0.0	0.0	35.4	0.0	0.0	0.4
	<i>Less desirable</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	<i>Undesirable</i>	0.0	0.0	9.9	0.0	0.0	1.6
	Total	0.0	0.0	45.3	0.0	0.0	2.0

<sup>†</sup>LS: Laguna Seca; SJ: San José; EP: El Porvenir.

recorded in LS, while the opposite occurred noticeably in EP for both density and biomass.

It should be noted that, of the three sites mentioned, and for both attributes of the evaluated vegetation, the least desirable species predominated in SJ, indicating the ranch's poor condition. Desirable species predominated at the MC site of LS, and the absence of undesirable species was notable, as it was at other ranch sites. The MDSMV site, found only in EP, and the MDSBG site of the same ranch were the only ones where biomass of undesirable species predominated, indicating the ranches' poorest condition.

Surveying and location of possible rangeland sites on satellite images can be done without major difficulties because of the existence of cartographic antecedents and the physiognomic, floristic and habitat descriptions of the main regional vegetation types, as well as the corresponding thematic cartography that enables establishing their relationship with relief, soil variants and geological origin (Aguirre-Rivera *et al.*, 2020). Rzedowski (1957) described crassicaule scrub as linked to soils of igneous origin, Rosetophile desert scrub as typical of hilly terrain of sedimentary origin, microphyll desert scrub as typical of limestone alluvial plains and grasslands common to the plains, and the transitions or ecotones between them, sometimes gradual and very extensive, and sometimes very marked and in little space, depending on the substratum and relief.

The differences in density and biomass recorded among the three rangeland sites present on the three ranches (Table 3) are attributable to notable differences in the pattern of use of the forage resource imposed by their owners, such as stocking rate and its spatial distribution (Holechek *et al.*, 2003). Lara-Juárez *et al.* (2016) surveyed three different sites in a single paddock in LS where the livestock had caused different impacts, evidenced by contrasts between groups of desirable species. Indeed, the differences in the pattern were clearly reflected in our study by the relative importance of species with different forage values and by the state of the corresponding soil surface (Table 4). None of the three ranches was exempt from deficiencies in their rangeland management, although LS stood out with the best soil surface state, the largest proportion of desirable species in three of its four sites, and the absence of undesirable species in the paddocks of its MDSSA site, denoting more abuse on the other two ranches at the same site.

The growing problem of rangeland deterioration in arid regions was also recognized by Lara-Juárez *et al.* (2016) and Bikila and Tessema (2017). Grouping the species registered during the surveys according to the forage value and scoring them based on the literature, direct observation, and opinions of local people was suitable for determining structural changes in the vegetation due to use patterns and in accordance with relevant antecedents for similar conditions (Solomon *et al.*, 2007; Lara-Juárez *et al.*, 2016; Bikila and Tessema, 2017; Aguirre-Rivera *et al.*, 2020) and, in general, for grazing spontaneous vegetation.

Regarding the evaluated structural attributes, density seemed to be more sensitive to slow relative changes associated with condition, particularly because biomass can be

**Table 4.** Mean soil surface cover (cm) in rangeland sites of three private ranches (n = five 500 m Canfield lines).

Ranch Site	Cover					Total
	Bare soil	Litter	Vegetation	Rocks	Feces	
<i>LS</i>						
<i>MDS-RDS</i>	92.8	27.7	324.4	33.3	21.8	500.0
<i>MDSBG</i>	174.2	55.8	261.7	0.0	8.3	500.0
<i>MDSSA</i>	100.0	26.7	336.6	0.0	36.7	500.0
<i>CS</i>	45.0	21.7	420.0	0.0	13.3	500.0
⊙	103.0	32.9	335.8	8.3	20.0	500.0
<i>SJ</i>						
<i>MDS-RDS</i>	285.4	46.3	122.3	40.0	6.0	500.0
<i>MDSBG</i>	259.6	40.7	191.9	0.6	7.2	500.0
<i>MDSSA</i>	292.2	66.4	141.4	0.0	0.0	500.0
⊙	279.1	51.1	151.9	13.5	4.4	500.0
<i>EP</i>						
<i>MDS-RDS</i>	366.1	38.3	92.3	3.3	0.0	500.0
<i>MDSBG</i>	360.4	27.3	102.3	10.0	0.0	500.0
<i>MDSSA</i>	326.4	23.3	139.0	0.0	11.3	500.0
<i>MDSMV</i>	230.0	82.7	173.0	14.3	0.0	500.0
⊙	320.7	42.9	126.7	6.9	2.8	500.0

removed by the livestock at any time and in any quantity without implying abuse. For this reason, although the problems of the vertical stratification of these rangelands and how to estimate their equitable structural importance persist, it may be convenient to compare the sensitivity of density (an estimator of abundance) with simple basal area (an estimate of biomass) generally used in grasslands (Parker, 1954) to evaluate structural changes caused by the grazing pattern.

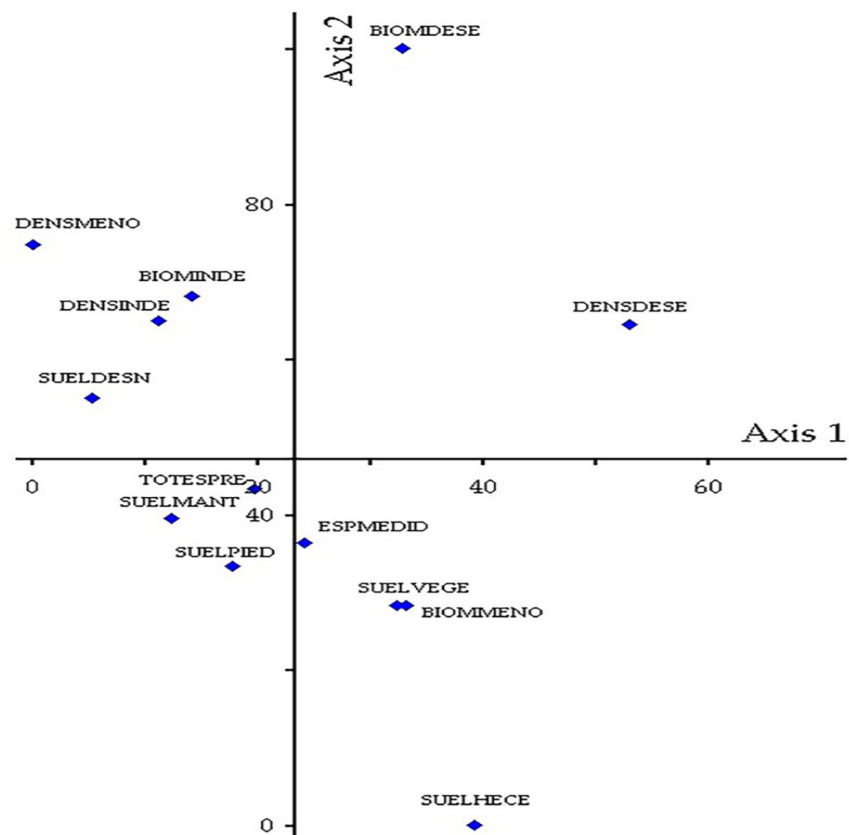
#### Differences in soil surface state between surveys

When estimating the state of the soil surface, it should be noted that, of the three rangeland sites found on the three ranches, those on EP had the highest mean values of bare soil (Table 4), implying that this ranch has the highest risk of erosion and desertification of the three ranches studied. However, the desirable species' density and biomass in EP were not the worst, possibly indicating a trend toward their recovery. It is worth mentioning that the soil surface of the rangeland sites on the LS ranch was outstanding, with the least amount of bare soil and the most vegetation of the three ranches studied. About the information on actual soil cover, the variables "bare soil", followed by the portion of soil covered by "vegetation" (equivalent to the structural attribute "basal area"), were those that were more closely related to condition, in accordance with its antecedents (Lara-Juárez *et al.*, 2016; Bikila and Tessema, 2017; Aguirre-Rivera *et al.*, 2020).

### Multivariate ordering of the attributes evaluated in the surveys

Of the multivariate analysis applied to the variables vegetation and soil cover evaluated at each rangeland site, only the representative value of the first two ordering axes provided significant information for interpretation. Thus, the density and biomass of undesirable species, the density of less desirable species, the proportion of biomass and density of desirable species, and the proportion of bare soil are depicted on the far left of the first axis (Figure 2). In the upper part of axis two, the most significant variables for evaluating condition are ordered (density and biomass of desirable and undesirable species, density of less desirable species, and the proportion of bare soil), and in the lower part are the variables that were less sensitive or important for evaluating condition.

The results of multivariate ordering using DECORANA, which was originally designed to adjust ecological data from samples and species, were also appropriate for determining behavioral gradients of the set of vegetation and soil variables evaluated

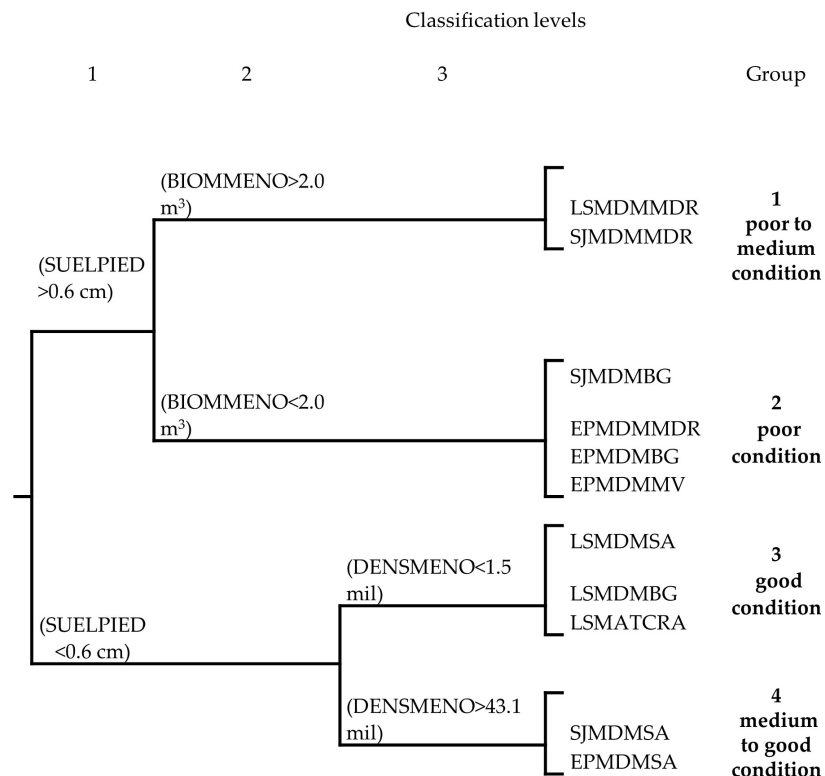


**Figure 2.** Bidimensional ordering of the variables evaluated in the rangeland sites of the studied ranches.

in this study and establishing the condition of different multi-branched rangeland sites subjected to different use patterns. These results coincided with those reported by Aguirre-Rivera *et al.* (2020) in semiarid rangelands under private management from 1993 to 2013, after parceling communal areas of the ejido El Castañón and Anexos, Catorce, San Luis Potosí. They also coincide with the pattern of gradients described by Reyes-Agüero *et al.* (2005) and Mora-López *et al.* (2011).

### Classification of the evaluated rangeland sites

A multivariate classification of the rangeland sites was obtained based on the evaluated vegetation and soil surface variables (Figure 3). The 11 rangeland sites were classified into four groups comprising two to four sites each. The indicator variable, or causation, typical of the first dichotomy was the proportion of area covered by rocks, which separated groups 1 and 2 (six sites) from groups 3 and 4 (five sites). Thus, group 1 included only two rangeland sites, corresponding to the transition, or ecotone, between rosetophile (typical of hilly lithosols) and microphyll scrub with a rockier surface than the others, and the third site of this transition was placed in group 2, possibly because its condition was worse than the preceding two.



**Figure 3.** Classification of the 11 rangeland sites evaluated on three private ranches on the High Plateau in San Luis Potosí and Zacatecas, Mexico.

The separating indicator variable between groups 1 and 2 from classification level 2 was the biomass of less desirable species. The difference was due to the poorer condition of the sites in group 2. In classification level 3, groups 3 and 4 were defined due to the variable density of less desirable species, possibly the most sensitive vegetation variable when the condition begins to deteriorate. Thus, group 3 consisted of three LS sites, the ranch with the least deteriorated rangelands of the three studied, and group 4 was made up of the best conserved sites of the SJ and EP ranches, both with *Sporobolus airoides* as the dominant grass. In this way, multivariate classification of the evaluated sites confirmed the validity of their identification as such, but it also showed the effect of condition on generating affinity or distance between them.

To finalize, we anticipate that with the vegetation and soil cover variables evaluated in this study and the results found, we will have more useful indicators for designing and establishing a profitable and persistent production system of grazing animals. We also confirm that the methodology used (identification of sites with Landsat images, supervised classification, ecological quantification of vegetation and soil, and multivariate analysis) can be used to determine the condition of rangelands in any production unit located in similar ecological regions with the presence of multi-branched scrub.

## CONCLUSIONS

The location and condition of multi-branched rangelands were studied using quantitative ecological methodology (the traditional method) supplemented with technology and analytical programming classification (the updated method), resulting in a satisfactory evaluation of the state of the rangelands on three privately owned cattle ranches on the High Plateau of the states of San Luis Potosí and Zacatecas, Mexico. The evaluation and classification of the 11 rangelands studied resulted in four condition groups, ranging from good to poor, with some transitions between the two extremes.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Our thanks to Ing. Jaime Valle Méndez, IAZ María de los Ángeles Vega Calzada and MVZ Herminio Gutiérrez Uribe, owners of LS, SJ, and EP respectively, for their enthusiastic willingness to support this study, to Estardo Camacho Rosales for his help in field work, and to the personnel of the herbarium IIZD of the UASLP, for identification of the collected specimens. We are grateful to the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-CONACYT for the scholarship No. 230424, granted to L. O. Negrete S. for doctoral studies and to the editorial group and referees of *Agrociencia* for the care and constructive rigor in the treatment of the original version.

## REFERENCES

- Aguirre-Rivera JR, Negrete-Sánchez LO, Castro-Rivera R. 2020. Effects of 20 years of parceling on the condition of communal rangeland on a Mexican ejido. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo* 52 (2): 189–203.
- Aldrete-Menchaca E, Aguirre-Rivera JR. 1982. Diferenciación de sitios y condición de agostaderos del noroeste del estado de Zacatecas. *Revista Chapingo* 7 (35–36): 53–58.

- Bikila NG, Tessema ZK. 2017. Effect of traditional rangeland management practices on vegetation structure and above ground biomass in East African semiarid rangelands. *FAO. Sustainable Pastoralism and Rangelands in Africa. Nature and Fauna* 31 (2): 31–35.
- Bolaños-Medina A, Aguirre-Rivera JR. 2000. Evaluación preliminar de los agostaderos forestales del occidente del Estado de México. *Acta Científica Potosina* 15 (2): 74–97.
- Canfield RH. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. *Journal of Forestry* 39 (4): 388–394.
- CONAZA (Comisión Nacional de Zonas Áridas). 1994. Manejo y rehabilitación de agostaderos de las zonas áridas y semiáridas de México: Región Norte. Comisión Nacional de Zonas Áridas. Saltillo, México. 116 p.
- Contreras-Hinojosa JR, Volke-Haller V, Oropeza-Mota JL, Rodríguez-Franco C, Martínez-Saldaña T, Martínez-Garza A. 2003. Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuatlán, Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 21 (3): 427–435.
- COTECOCA (Comisión Técnico-Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero). 1974. Coeficientes de agostadero de la República Mexicana, estado de San Luis Potosí. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Ciudad de México, México. 158 p.
- Cottam G, Curtis JT. 1956. The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology* 37 (3): 451–460.
- Dyksterhuis EJ. 1949. Condition and management of rangeland based on quantitative ecology. *Journal of Range Management* 2: 104–115.
- Easdale MH, Umaña F, Raffo F, Fariña C, Bruzzone O. 2019. Evaluación de pastizales patagónicos con imágenes de satélites y de vehículos aéreos no tripulados. *Ecología Austral* 29 (3): 306–314.
- Holechek JL, Galt D, Joseph J, Navarro J, Kumalo G, Molinar F, Thomas M. 2003. Moderate and light cattle grazing effects on Chihuahuan Desert rangelands. *Journal of Range Management* 56: 133–139.
- Holechek JL, Pieper RD, Herbel CH. 2011. Range management, principles and practices (6th Edition). Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA. 444 p.
- Holechek JL. 1991. Chihuahuan desert rangeland, livestock grazing and sustainability. *Rangelands* 13 (3): 115–120.
- Humphrey RR. 1949. Field comments on the range condition method of forage survey. *Journal of Range Management* 2: 1–10.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2007. Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Superficie total de las unidades de producción según uso del suelo, SLP. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=24#collapse-Tabulados> (Retrieved: December 2022).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2017. Cartas físicas temáticas. Temas: geológica, hidrología superficial, hidrología subterránea, edafológica, climatológica y vegetación y uso actual. San Luis Potosí, México.
- Lara-Juárez P, Castillo-Lara P, Tristán-Patiño F de M, Rendón-Huerta JA, Aguirre-Rivera JR. 2016. Range site and condition effects on “escamoles” ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) nest density. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22 (3): 285–302. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.04.016>
- Lasanta T. 2010. Pastoreo en áreas de montaña: estrategias e impactos en el territorio. *Estudios Geográficos* 71 (268): 203–233. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.0459>
- McCune B, Mefford MJ. 2011. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data. Version 6.0 MjM Software, Gleneden Beach, OR, USA.
- Medina-García G, Gutiérrez-Luna R, Echavarría-Chairez FG, Amador-Ramírez MD, Ruíz-Corral JA. 2009. Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. *Técnica Pecuaria México* 47: 135–144.
- Mellink E, Valenzuela S. 1995. Efecto de la condición de agostaderos sobre los roedores y lagomorfos en el Altiplano Potosino, San Luis Potosí, México. *Acta Zoológica Mexicana* 64: 35–44.

- Mora-López JL, Reyes-Agüero JA, Flores-Flores JL, Peña-Valdivia CB, Aguirre-Rivera JR. 2011. Variación morfológica y humanización de la sección *Salmiana* del género *Agave*. *Agrociencia* 45 (4): 465–477.
- Negrete-Sánchez LO, Aguirre-Rivera JR, Pinos-Rodríguez JM, Reyes-Hernández H. 2016. Beneficio de la parcelación de los agostaderos comunales del ejido “El Castañón”, municipio Catorce, San Luis Potosí: 1993-2013. *Agrociencia* 50 (4): 511–532.
- Parker KW. 1954. Application of ecology in the determination of range condition and trend. *Journal of Range Management* 7 (1): 14–23.
- Pinos-Rodríguez JM, García-López JC, Aguirre-Rivera JR, Reyes-Hernández H. 2013. Participatory cartography in a traditional goat production system of a smallholder community in northern México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 16 (2): 215–222.
- Reyes-Agüero JA, Aguirre-Rivera JR, Flores-Flores JL. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) en relación con su domesticación en la altiplanicie meridional de México. *Interciencia* 30 (8): 476–484.
- Ruechel J. 2012. Grass-fed cattle: how to produce and market natural beef. Storey Publishing: North Adams, MA, USA. 384 p.
- Rzedowski RJ. 1957. Vegetación de las partes áridas de los estados de San Luis Potosí y Zacatecas. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 18: 49–101.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2021. Normales climatológicas por estación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional. Ciudad de México, México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=slp> (Recuperado: enero 2019).
- Solomon TB, Snyman HA, Smit GN. 2007. Cattle-rangeland management practices and perceptions of pastoralists towards rangeland degradation in the Borana zone of southern Ethiopia. *Journal of Environmental Management* 82 (4): 481–494. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.01.008>
- Tamayo JL. 2012. Geografía moderna de México (13a edición). Trillas: Ciudad de México, México. 486 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2013. Interagency ecological site handbook for rangelands. Washington, DC, USA. 220 p. <https://jornada.nmsu.edu/files/InteragencyEcolSiteHandbook.pdf> (Recuperado: enero 2021).
- Valentine JF. 1990. Grazing management. Academic Press: San Diego, CA, USA. 533 p.

## EVALUACIÓN TRADICIONAL Y ACTUALIZADA DE SITIO Y CONDICIÓN DE AGOSTADERO EN MATORRALES SEMIÁRIDOS DEL ALTIPLANO

Juan Rogelio Aguirre-Rivera<sup>1</sup>, Luis Octavio Negrete-Sánchez<sup>1\*</sup>, Rigoberto Castro-Rivera<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Altair No. 200, Col. del Llano, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. C. P. 78377.

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5, Santa Inés Tecuexcomac, Tlaxcala, México. C. P. 90700

\* Autor para correspondencia: luis.negrete@uaslp.mx

### RESUMEN

En México están poco difundidos los conceptos de sitio y condición de agostadero. Por ello, la mayoría de los agostaderos de los ranchos privados del Altiplano Potosino-Zacatecano se encuentran en un proceso de deterioro severo y generalizado. El objetivo del estudio fue reconocer y caracterizar sitios de agostadero multiramificados de tres ranchos productores de ganado bovino para carne del Altiplano Potosino-Zacatecano y evaluar su condición mediante el método ecológico cuantitativo complementado con herramientas tecnológicas actuales. La hipótesis postulada fue que el sitio y condición de agostadero evaluado por el método ecológico cuantitativo (usado para zacatales y suelo), complementado con tecnología actual, es también identificable en los agostaderos multiramificados de ese tipo de unidades de producción del Altiplano Potosino-Zacatecano. Con base en una imagen satelital Landsat, se realizó un proceso de clasificación no supervisada para los tres ranchos que posteriormente se supervisó con recorridos de campo. En total, fueron reconocidos 11 sitios, tres presentes en cada rancho (matorral desértico micrófilo con predominio de *Bouteloua gracilis*, matorral desértico micrófilo con predominio de *Sporobolus airoides* y el ecotono entre matorral desértico micrófilo y matorral desértico rosetófilo) y dos exclusivos (matorral Crasicaule y matorral desértico micrófilo con predominio de *Muhlenbergia villiflora*). La condición de agostadero se evaluó mediante la densidad y volumen (biomasa volumétrica) de las principales especies vegetales, agrupadas por valor forrajero y del estado actual de la superficie del suelo, por las porciones de suelo desnudo y cubiertas con vegetación, mantillo, heces y piedras. Los datos se analizaron mediante ordenación y clasificación multivariable con los módulos DECORANA y TWINSPAN del programa PC-ORD. La evaluación de sitio y condición bajo este enfoque fue satisfactoria para reconocer el estado de las tierras de pastoreo de los tres ranchos ganaderos privados estudiados en el Altiplano Potosino Zacatecano.

**Palabras clave:** análisis multivariable, bovinos en matorrales, clasificación supervisada, cobertura del suelo, sitio de agostadero.

**Citation:** Aguirre-Rivera JR, Negrete-Sánchez LO, Castro-Rivera R. 2023. Evaluación tradicional y actualizada de sitio y condición de agostadero en matorrales semiáridos del altiplano. *Agrociencia* 57(3): 589-621. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2620>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: February 18, 2022.  
Approved: February 08, 2023.  
**Published in Agrociencia:**  
March 30, 2023.

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



## INTRODUCCIÓN

El 50 % de la superficie terrestre es utilizada como agostadero (Holechek *et al.*, 2011). En San Luis Potosí, más de 1.6 millones de ha están ocupadas por agostaderos (INEGI, 2007), sitios de alimentación del ganado mediante vegetación espontánea que son utilizados principalmente para la cría de ganado en condiciones de pastoreo (CONAZA, 1994). El pastoreo propicia modificaciones en la vegetación, de manera semejante a lo causado por otras actividades que desarrolla el hombre (Lasanta, 2010). Las tierras de pastoreo son un recurso natural que, al ser aprovechado de manera racional, puede ser productivo y ambientalmente estable por tiempo indefinido (Holechek, 1991). Sin embargo, el abuso de las tierras de pastoreo en el Altiplano Potosino-Zacatecano es evidente, y la mortandad de ganado que ocurre durante las sequías es, al momento, el único remedio para su recuperación temporal. Por lo tanto, el proceso inconsciente de desertificación derivado ocurre y se generaliza, al mismo tiempo que se reduce el potencial de producción orgánica de estas tierras de manera gradual e irreversible (Negrete-Sánchez *et al.*, 2016).

La principal forma de producción actual de carne de bovinos es aún extensiva, sustentada en pastoreo de agostaderos (Ruechel, 2012). Para aprovechar los agostaderos con fundamento ecológico, se han desarrollado técnicas para valorar el potencial de sitio, la condición y la tendencia de los agostaderos, cuya definición y procedimiento fueron desarrollados durante la primera mitad del siglo pasado, especialmente para los zacatales climáticos de Norte América (Dyksterhuis, 1949). Holechek *et al.* (2011) definieron un sitio de agostadero como una unidad de paisaje, resultado de la combinación de factores bióticos y abióticos del medio los cuales, en conjunto, determinan la producción primaria.

La condición de agostadero se estima para caracterizar el estado actual de la composición botánica del agostadero con respecto a la vegetación clímax. Bajo este enfoque, se clasifica en cuatro categorías: pobre, regular, buena y excelente, en dependencia de la importancia relativa de las especies presentes, el valor forrajero y la respuesta al pastoreo (Dyksterhuis, 1949). Humphrey (1949), por su parte, consideró la condición como la cantidad de forraje actual producido con respecto a la cantidad máxima que podría producir el sitio, a lo cual se le conoce como potencial de sitio. Sin embargo, Holechek *et al.* (2011), propusieron que la condición de un sitio de agostadero debe establecerse por medio de combinaciones de las variables estructurales y funcionales de la vegetación y del estado o cobertura del suelo. La tendencia del agostadero representa el rumbo probable de la condición basada en la sucesión de especies, lo que puede determinar un cambio progresivo hacia la mejora del agostadero, regresivo por deterioro, estable si no refleja cambio, o divergente si una parte mejora, pero otra empeora. Esta metodología se ha aplicado a todas las tierras públicas y privadas de pastoreo con zacatales del suroeste de los EE. UU. (USDA, 2013). En México, sólo en los años sesenta del siglo pasado se hizo un intento incom-

pleto de la aplicación de estas técnicas de evaluación de los agostaderos, desde pastizales hasta matorrales, bosques y selvas (COTECOCA, 1974). Aunque las cargas animales medias actuales en la mayoría de los ranchos de propiedad privada en México pueden considerarse excesivas, algunos ganaderos mantienen cargas moderadas, con resultados relevantes en los indicadores de reproducción y producción de sus hatos (CONAZA, 1994). En algunos de estos ranchos hay diferencias visuales desde sutiles a muy marcadas (Figura 1) en la estructura de la vegetación y el estado de la superficie del suelo.



**Figura 1.** A: agostadero de propiedad privada, Rancho San José, Villa de Cos, Zacatecas, en buena condición, en sitio de Matorral Desértico Micrófilo con dominancia de *Sporobolus airoides*; B: agostadero de propiedad social, ejido Noria de Gutiérrez, Charcas, San Luis Potosí, de condición pobre (imagen captada con un dron el 6 de octubre de 2022 en época húmeda del año).

Las bondades del análisis multivariable para la clasificación de agostaderos mediante gradientes de condición fueron destacadas por Bolaños-Medina y Aguirre-Rivera (2000) y Aguirre-Rivera *et al.* (2020); aunque esta técnica no ha sido muy utilizada en estudios de agostaderos, sí lo ha sido en otros estudios correspondientes a la identificación de gradientes de las variaciones morfológicas de nopal domesticado por Reyes-Agüero *et al.* (2005), así como de la sección *Salmiana* del género *Agave* por Mora-López *et al.* (2011). Respecto al uso de imágenes satelitales, Medina *et al.* (2009) y Easdale *et al.* (2019) utilizaron imágenes SPOT y VANT para identificar sitios de agostadero para estimar producción de forraje a través de un proceso de clasificación no supervisada y un índice de vegetación de diferencia normalizada, respectivamente.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue aplicar la información local publicada para distinguir y caracterizar los sitios de agostadero multiramificados (compuestos por herbáceas, zacates y leñosas) y evaluar su condición utilizando el método ecológico cuantitativo complementado con herramientas tecnológicas actuales, en tres ranchos productores de ganado bovino para carne del Altiplano Potosino-Zacatecano. La hipótesis postulada fue que los sitios y las condiciones de agostadero evaluados por el método ecológico cuantitativo (usado para zacatales y suelo), complementado con tecnología actual, son también identificables en los agostaderos multiramificados de los ranchos privados del Altiplano Potosino-Zacatecano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Aspectos generales de los ranchos estudiados

Los tres ranchos son de propiedad privada y se encuentran en el Altiplano Potosino-Zacatecano, situado en la porción sur del desierto Chihuahuense, en la región geomorfológica denominada Altiplanicie Septentrional (Tamayo, 2012). Estos ranchos cuentan con pozos profundos, equipo de bombeo y depósitos de agua (embalses producto de escorrentías superficiales), con lo cual han establecido redes de aguajes; además, cuentan con caminos, corrales de manejo, cercos linderos y divisorios de potreros, saladeros, etc. La descripción física del lugar de trabajo se basó en las cartas temáticas del INEGI (2017): el sustrato geológico en San José (SJ) y El Porvenir (EP) es de origen cuaternario, terciario y del cretácico inferior, de rocas sedimentarias; en Laguna Seca (LS) el sustrato también es sedimentario, pero de lutita-arenisca del triásico y existen afloramientos de roca ígnea extrusiva ácida de origen terciario.

Los tres ranchos se ubican en la región hidrológica "El Salado". El suelo dominante en los tres ranchos es xerosol háplico y el secundario es litosol, de textura media en fase petrocálcica; en LS también hay rendzina, litosol y regosol calcárico, de textura media en fase lítica, mientras en SJ hay regosol calcárico y litosol, de textura media en fase lítica. El clima en LS es BS<sub>0</sub>kw(x'); por su parte,

en SJ y EP el clima es BS<sub>0</sub>kw. El periodo seco del año en los tres ranchos abarca un aproximado de siete meses (SMN, 2021). Los tipos de vegetación presentes en los tres ranchos son Matorral Desértico Micrófilo y, en menor proporción, Matorral Desértico Rosetófilo; además, en LS, hay áreas con Matorral Crasicaule en los afloramientos ígneos.

### Caracterización de la vegetación

Con base en imágenes satelitales LANDSAT de febrero de 2017, en septiembre de ese año se procedió a la clasificación no supervisada en ARC GIS® v.10, con cinco clases de cobertura, para identificar los distintos tipos de vegetación existentes en cada uno de los tres ranchos. Luego, se reconocieron en el campo las variantes de vegetación de interés para el estudio. Dos de las clases de cobertura de cada rancho se desestimaron, ya que una correspondió al Matorral Desértico Rosetófilo ubicado en zonas cerriles inaccesibles para el ganado bovino debido a su pendiente; y la restante, porque correspondió a las áreas con suelo desnudo (camino).

En los tres ranchos hubo tres variantes de vegetación coincidentes: el ecotono entre el Matorral Desértico Micrófilo y el Matorral Desértico Rosetófilo (MDM-MDR) y dos variantes de Matorral Desértico Micrófilo, una con predominio de *Bouteloua gracilis* (MDMBG), y otra con predominio de *Sporobolus airoides* (MDMSA). Además, en EP hubo otra variante del Matorral Desértico Micrófilo con predominio de *Muhlenbergia villiflora* (MDMMV), y sólo en LS se registró el Matorral Crasicaule (MC). Estas variantes de los tipos de vegetación característicos del desierto Chihuahuense pueden ser considerados como sitios de agostadero de acuerdo con la definición correspondiente (Holechek *et al.*, 2011). En cada uno de estos 11 sitios se recolectaron las especies perennes; las especies anuales, aunque formaron parte de estadios seriales iniciales, fueron descartadas por carecer de efectos significativos en la productividad del agostadero al ser su permanencia efímera. Los especímenes recolectados se identificaron y depositaron en el Herbario Isidro Palacios (SLPM) del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

### Mediciones estructurales de la vegetación

Las cartas temáticas y los planos generados de la clasificación no supervisada, con base en recorridos de campo realizados entre agosto y septiembre de 2018 (segunda mitad del periodo de lluvias o de crecimiento), permitieron ubicar dos áreas de muestreo en cada uno de los sitios de agostadero reconocidos. Se aplicó el método sin parcela de cuadrantes centrados en puntos sobre transectos (Cottam y Curtis, 1956) con las adecuaciones realizadas por Aldrete-Menchaca y Aguirre-Rivera (1982) para su uso en vegetación multiestratificada. Los transectos se definieron con un cordel de nylon de 100 m de largo, tensado

con estacas de acero. La ubicación de los transectos siempre fue al menos a 50 m de cualquier cerco, en la parte central de la fisonomía del sitio reconocido y en sentido perpendicular a la pendiente. Los puntos de inicio y final de cada transecto se georreferenciaron para posibilitar evaluaciones posteriores; a cada 20 m del transecto colocado se instaló de manera perpendicular otro cordel de 10 m para conformar los cuatro cuadrantes.

Antes de iniciar las mediciones se recorrió el entorno del transecto para recolectar especímenes y elaborar un listado de las especies de plantas perennes más abundantes de cada uno de los cuatro estratos reconocidos en estos matorrales: herbáceo, arbustivo inferior, arbustivo superior y arborescente. También se registró el resto de las especies perennes presentes observadas en el potrero para recolectarlas e integrar la lista botánica completa. En cada cuadrante se midió la distancia del punto al pie de la planta más cercana y, además de su especie y la distancia, se registró el diámetro basal, diámetro superior y su altura. Este proceso se hizo en secuencia por estrato, para lo cual se comenzó con el estrato herbáceo por ser el más denso y susceptible a sufrir daños por pisoteo, y luego se procedió con cada uno de los estratos restantes.

En las plantas amacolladas o agrupadas en colonias, la distancia desde el punto se midió hasta el centro del conjunto y para el resto de las plantas hasta su parte basal más próxima al punto (Aldrete-Menchaca y Aguirre-Rivera, 1982). En el caso de los izotes, mezquites y huizaches muy grandes, la altura se determinó con un clisímetro. Las especies de plantas registradas con el muestreo se clasificaron según su valor forrajero y su reacción sucesional al pastoreo, como deseables, menos deseables e indeseables (Valentine, 1990). Para calcular la densidad de cada especie se utilizó el recíproco del cuadrado de la distancia media de dicha especie (área media de la especie), de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\text{Densidad de la especie } i = \frac{\text{unidad de área}}{\text{distancia media}^2 \text{ de la especie } i}$$

donde el término 'unidad de área' es la superficie de referencia para expresar la densidad, en las mismas unidades que el área media de las especies.

Para la estimación de la biomasa volumétrica instantánea de cada individuo se utilizó la fórmula del cono truncado invertido:

$$V = 1/3 \pi h (R^2 + r^2 + Rr)$$

donde,  $\pi = 3.1416$ ,  $h$  representa la altura o distancia entre los dos radios,  $R$  el radio de la copa y  $r$  el radio basal.

### Estado de la superficie del suelo

La estimación del estado de la superficie del suelo en cada levantamiento se hizo mediante cinco líneas Canfield de intercepción (Canfield, 1941) de 5 m de longitud, instaladas de forma paralela y alterna al transecto principal, a las cuales también se georreferenciaron su inicio y su final. A lo largo de estas líneas se midieron las porciones de suelo desnudo y las cubiertas con vegetación, mantillo, piedras o heces. Los valores medios de dichos componentes expresados en centímetros fueron resumidos y arreglados en forma tabular. Con los datos de vegetación y cobertura del suelo (13 variables) de los 11 sitios de agostadero estudiados en los tres ranchos, se conformó una matriz 13 x 11 (Cuadro 1), la cual se procesó con los programas de análisis multivariable del paquete PC-ORD v. 6 (McCune y Mefford, 2011), en específico, con el módulo de Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DECORANA - Detrended Correspondence Analysis) para la ordenación de las variables de vegetación y suelo, y el Análisis bidireccional de especies indicadoras (TWINSPAN - Two-way indicator species analysis) para la clasificación de los sitios de agostadero.

**Cuadro 1.** Variables incluidas en el análisis multivariable de los agostaderos estudiados.

Variable	Acrónimo
Total de especies perennes medidas	TOTAESPE
Total de especies perennes presentes	TOTESPRE
Densidad de especies deseables	DENSDESE
Densidad de especies menos deseables	DENSMENO
Densidad de especies indeseables	DENSINDE
Biomasa de especies deseables	BIOMDESE
Biomasa de especies menos deseables	BIOMMENO
Biomasa de especies indeseables	BIOMINDE
Suelo desnudo	SUELDESN
Suelo cubierto con mantillo	SUELMANT
Suelo cubierto con vegetación	SUELVEGE
Suelo cubierto con heces	SUELHECE
Suelo cubierto con piedras	SUELPIED
Ecotono MDM-MDR Laguna Seca	LSMDMMDR
Ecotono MDM-MDR San José	SJMDMMDR
Ecotono MDM-MDR El Porvenir	EPMDMMDR
MDM con predominio de <i>Bouteloua gracilis</i> San José	SJMDMBG
MDM con predominio de <i>Bouteloua gracilis</i> El Porvenir	EPMDMBG
MDM con predominio de <i>Bouteloua gracilis</i> Laguna Seca	LSMDMBG
MDM con predominio de <i>Muhlenbergia villiflora</i> El Porvenir	EPMDMMV
MDM con predominio de <i>Sporobolus airoides</i> Laguna Seca	LSMDMSA
MDM con predominio de <i>Sporobolus airoides</i> San José	SJMDMSA
MDM con predominio de <i>Sporobolus airoides</i> El Porvenir	EPMDMSA
MC Laguna Seca	LSMATCRA

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parte del método para determinar la condición de agostadero aplicado en esta investigación coincide con el utilizado por Contreras *et al.* (2003) en los agostaderos comunales de Yanhuitlán, Oaxaca, en el que utilizaron líneas de Canfield para evaluar la condición de agostadero. Asimismo, algunas de las variables evaluadas del presente estudio coinciden con las aplicadas por Solomon *et al.* (2007) en el estudio de la percepción de la degradación de los agostaderos del sur de Borana, Etiopía, cuyos principales indicadores del deterioro fueron: la disminución en la abundancia de poáceas deseables, el incremento de especies leñosas indeseables y el incremento de la porción de suelo desnudo.

La misma técnica fue utilizada para evaluar condición de agostadero por Lara-Juárez *et al.* (2016) en otro estudio para determinar la relación de la condición de agostadero y la presencia de nidos de hormigas escamoleras en un agostadero compartido por un rancho privado y un ejido colindante en Charcas, San Luis Potosí, aunque sólo clasificaron cualitativamente la condición de agostadero como: mejor, peor e intermedia. Por su parte, Mellink y Valenzuela (1995) también utilizaron el concepto de condición de agostadero de forma cualitativa y clasificaron sus hallazgos con los términos mejor y peor condición.

### Caracterización de la vegetación

La densidad (individuos ha<sup>-1</sup>) y biomasa volumétrica instantánea (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) de las principales especies perennes se estimó en cuatro sitios de agostadero de LS con 112 puntos de muestreo, en tres sitios de SJ con 120 puntos de muestreo, y en cuatro sitios en EP con 108 puntos de muestreo, para un total de 340 puntos de muestreo equivalentes a 1360 cuadrantes y 3996 individuos de especies de plantas medidos. Durante el estudio, se midieron e identificaron en los levantamientos 12 especies preponderantes en LS, 16 en SJ, y 12 en EP (Cuadro 2). Además, se observaron fuera de las muestras otras 36 especies perennes en LS, 25 en SJ y 28 en EP, para completar una lista florística total de 48 especies perennes en LS, 41 en SJ y 40 en EP.

La composición florística total registrada en los tres ranchos del presente estudio (Cuadro 2) fue, en general, similar cualitativa y cuantitativamente a lo descrito por diversos autores para la vegetación de condiciones ambientales análogas (Rzedowski 1957; Bikila y Tessema, 2017; Aguirre-Rivera *et al.*, 2020). Asimismo, Pinos-Rodríguez *et al.* (2013) registraron 38 especies consumidas por cabras en agostaderos comunales de Villa de Guadalupe, San Luis Potosí. Por su parte, Lara-Juárez *et al.* (2016), en su estudio de escamoles, encontraron 35 especies en el potrero “Siete Vueltas” del rancho LS y sólo 22 en el ejido “Francisco I. Madero”, separados ambos predios por el lindero cercado, aun cuando comparten los mismos sitios de agostadero y el muestreo se basó en el mismo tamaño de muestra. La diferencia observada es un indicador de la degradación de los agostaderos comunales debida al sobrepastoreo severo y generalizado sin límites individuales de la carga animal (Lara-Juárez *et al.*, 2016;

**Cuadro 2.** Especies registradas y su valor forrajero en los sitios de agostadero estudiados en los ranchos Laguna Seca (1), San José (2) y El Porvenir (3).

Especies	Estrato <sup>†</sup>				VF <sup>‡</sup>	Rancho
	A	B	C	D		
<i>Acacia schaffneri</i> (S. Watson) F.J. Herm.				x	M	1, 2
<i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm.			x		M	1
<i>Bouteloua curtispindula</i> (Michx.) Torr.	x				D	1
<i>Bouteloua gracilis</i> (Willd. ex Kunth) Lag. ex Griffiths	x				D	1, 2, 3
<i>Calliandra eriophylla</i> Benth		x			D	1
<i>Celtis pallida</i> Torrey			x		I	1
<i>Condalia mexicana</i> Schlttdl.			x		I	2
<i>Cylindropuntia imbricata</i> (Haw.) F.M. Knuth			x		I	2
<i>Dalea bicolor</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.		x			D	1
<i>Dasyochloa pulchella</i> (Kunth) Willd. ex Rydb.	x				M	2, 3
<i>Erioneuron avenaceum</i> (Kunth) Tateoka	x				D	3
<i>Flourensia cernua</i> DC.			x		I	3
<i>Larrea tridentata</i> (Sessé & Moc. ex DC.) Cov.			x		I	1, 2, 3
<i>Lycurus phleoides</i> Kunth	x				M	1
<i>Mimosa biuncifera</i> Benth			x		I	2
<i>Muhlenbergia villiflora</i> Hitchc.	x				D	3
<i>Opuntia cantabrigiensis</i> Lynch			x		M	1, 2, 3
<i>Opuntia rastrera</i> F.A.C.Weber		x			M	1, 2, 3
<i>Parthenium argentatum</i> A. Gray		x			D	2, 3
<i>Parthenium incanum</i> Kunth		x			D	3
<i>Sporobolus airoides</i> (Torrey) Torrey	x				D	1, 2, 3
<i>Yucca filifera</i> Chabaud				x	M	2, 3

<sup>†</sup>Estrato: A: herbáceo; B: arbustivo inferior; C: arbustivo superior, D: arborescente. <sup>‡</sup>Valor forrajero para vacunos. D: deseable; M: menos deseable; I: indeseable.

Negrete-Sánchez *et al.*, 2016), a comparación con los ranchos privados, donde los dueños pueden decidir con mayor facilidad ajustes de la carga animal y su distribución espacial.

### Diferencias estructurales de la vegetación debidas al patrón de aprovechamiento de potreros en el mismo sitio de agostadero

A diferencia de otros estudios en los que se evaluaron agostaderos, pero no indicaron la clase de vegetación encontrada (Contreras *et al.*, 2003; Solomon *et al.*, 2007; Bikila y Tessema, 2017), en el presente estudio sí se identificaron a detalle los sitios de agostadero presentes en los tres ranchos para evaluar y determinar su condición.

Los tres ranchos presentan tres sitios de agostadero coincidentes: MDM-MDR, MDMBG y MDMSA; además, en LS se registró MC, y en EP MDMMV (Cuadro 3). Al considerar la condición de los sitios de agostadero identificados, se tuvieron resultados muy contrastantes. La densidad y la biomasa de las especies deseables en dos (MDM-MDR y MDMBG) de los tres sitios de agos-

**Cuadro 3.** Densidad (miles de individuos ha<sup>-1</sup>) y biomasa volumétrica media ponderada (miles de m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) de las especies agrupadas según su valor forrajero en los tres ranchos estudiados<sup>†</sup>.

Sitio Valor forrajero	Densidad			Biomasa		
	LS	SJ	EP	LS	SJ	EP
<i>MDM-MDR</i>						
<i>Deseables</i>	456.9	13.3	25.4	1.9	0.2	1.6
<i>Menos deseables</i>	2.4	25.3	15.6	4.8	2.0	0.1
<i>Indeseables</i>	1.0	3.7	0.5	0.7	1.0	0.1
Total	460.3	42.3	41.5	7.4	3.2	1.8
<i>MDMBG</i>						
<i>Deseables</i>	160.9	31.8	36.7	7.3	1.5	0.3
<i>Menos deseables</i>	1.5	35.5	0.0	1.0	1.8	0.0
<i>Indeseables</i>	1.7	1.6	2.9	1.6	1.0	2.5
Total	164.1	68.9	39.6	9.9	4.3	2.8
<i>MDMSA</i>						
<i>Deseables</i>	4.0	35.0	313.0	2.0	2.4	30.7
<i>Menos deseables</i>	0.8	86.0	43.2	3.9	0.7	3.4
<i>Indeseables</i>	0.0	1.1	7.8	0.0	0.9	2.9
Total	4.8	122.1	364.0	5.9	4.0	37.0
<i>MC</i>						
<i>Deseables</i>	741.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0
<i>Menos deseables</i>	0.7	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0
<i>Indeseables</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	741.7	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0
<i>MDMMV</i>						
<i>Deseables</i>	0.0	0.0	35.4	0.0	0.0	0.4
<i>Menos deseables</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Indeseables</i>	0.0	0.0	9.9	0.0	0.0	1.6
Total	0.0	0.0	45.3	0.0	0.0	2.0

<sup>†</sup>LS: Laguna Seca; SJ: San José; EP: El Porvenir.

tadero presentes en los tres ranchos, fue muy superior en LS, lo cual fue más evidente con los valores de densidad que con los de biomasa. En el tercer sitio de agostadero común (*MDMSA*) resultó lo opuesto, pues en LS se registraron los valores más bajos, y lo contrario sucedió notablemente en EP, tanto para densidad como para biomasa.

Cabe señalar que de los tres sitios mencionados y para ambos atributos de la vegetación evaluados, en SJ predominaron las especies menos deseables, como indicación clara de una condición pobre en este rancho. En el sitio *MC* de LS predominaron las especies deseables y fue notable la ausencia de especies indeseables, tal como sucedió en los otros sitios de este rancho. El sitio *MDMMV* presente sólo en EP y el sitio *MDMBG* del mismo rancho fueron los únicos donde predominó la biomasa de especies indeseables, que denotan las peores condiciones registradas en los tres ranchos.

El reconocimiento y ubicación de los sitios de agostadero posibles a partir de las imágenes de satélite pudo hacerse sin mayor dificultad, por la existencia de antecedentes cartográficos y sobre la descripción fisonómica, florística y de hábitat de los principales tipos de vegetación regionales, y la cartografía temática correspondiente para poder establecer su relación con el relieve, las variantes de suelo y su origen geológico (Aguirre-Rivera *et al.*, 2020). Así, Rzedowski (1957) describió el Matorral Crasicaule vinculado a suelos de origen ígneo, el Matorral Desértico Rosetófilo propio de terrenos cerriles de origen sedimentario, el Matorral Desértico Micrófilo típico de planicies aluviales calizas y los zacatales comunes de las planicies, y las transiciones o ecotonos entre ellos, a veces graduales y muy extensas, y en ocasiones muy marcadas y en poco espacio, en dependencia del sustrato y del relieve.

Las diferencias en densidad y biomasa registradas entre los tres sitios de agostadero presentes en los tres ranchos (Cuadro 3) son atribuibles a diferencias notables en el patrón de aprovechamiento del recurso forrajero impuesto por sus propietarios, tales como la carga animal y su distribución espacial (Holechek *et al.*, 2003). Lara-Juárez *et al.* (2016) reconocieron tres sitios diferentes en un único potrero en LS, de manera que el ganado había provocado un impacto diferente en ellos por sus contrastes entre los grupos de especies deseables. En efecto, las diferencias en dicho patrón se reflejaron con claridad en el presente estudio, en la importancia relativa de especies con distinto valor forrajero y en el estado de la superficie de suelo correspondiente (Cuadro 4). Ninguno de los

**Cuadro 4.** Cobertura media superficial del suelo (cm) en los sitios de agostadero de tres ranchos privados (n= cinco líneas Canfield de 500 cm).

Rancho	Cover					Total
	Suelo desnudo	Mantillo	Vegetación	Piedras	Heces	
<i>LS</i>						
<i>MDM-MDR</i>	92.8	27.7	324.4	33.3	21.8	500.0
<i>MDMBG</i>	174.2	55.8	261.7	0.0	8.3	500.0
<i>MDMSA</i>	100.0	26.7	336.6	0.0	36.7	500.0
<i>MC</i>	45.0	21.7	420.0	0.0	13.3	500.0
⊙	103.0	32.9	335.8	8.3	20.0	500.0
<i>SJ</i>						
<i>MDM-MDR</i>	285.4	46.3	122.3	40.0	6.0	500.0
<i>MDMBG</i>	259.6	40.7	191.9	0.6	7.2	500.0
<i>MDMSA</i>	292.2	66.4	141.4	0.0	0.0	500.0
⊙	279.1	51.1	151.9	13.5	4.4	500.0
<i>EP</i>						
<i>MDM-MDR</i>	366.1	38.3	92.3	3.3	0.0	500.0
<i>MDMBG</i>	360.4	27.3	102.3	10.0	0.0	500.0
<i>MDMSA</i>	326.4	23.3	139.0	0.0	11.3	500.0
<i>MDMMV</i>	230.0	82.7	173.0	14.3	0.0	500.0
⊙	320.7	42.9	126.7	6.9	2.8	500.0

tres ranchos estuvo exento de deficiencias en la gestión de sus agostaderos. Aunque LS destacó con el mejor estado de la superficie del suelo, la mayor proporción de especies deseables en tres de sus cuatro sitios y la ausencia de especies indeseables en los potreros de su sitio MDMSA, éste denota un abuso mayor que el registrado para el mismo sitio en los otros dos ranchos.

El problema de deterioro creciente en agostaderos de zonas áridas también fue reconocido por Lara-Juárez *et al.* (2016) y Bikila y Tessema (2017). La agrupación de las especies registradas en los levantamientos de acuerdo con su valor forrajero, calificado con base en la bibliografía, observación directa y opiniones de la gente de campo, resultó adecuada para reconocer los cambios estructurales de la vegetación debidas al patrón de aprovechamiento, en concordancia con los antecedentes al respecto para condiciones similares (Solomon *et al.*, 2007; Lara-Juárez *et al.*, 2016; Bikila y Tessema, 2017; Aguirre-Rivera *et al.*, 2020), y en general para el pastoreo de vegetación espontánea.

En cuanto a los atributos estructurales evaluados, pareciera que la densidad resultó más sensible a los cambios relativos lentos asociados a la condición, en particular porque la biomasa puede ser removida por el ganado en cualquier momento y cantidad sin que ello implique un abuso. Por ello, aunque persista el problema de la estratificación en el sentido vertical de estos agostaderos y del cómo estimar su importancia estructural equitativa, tal vez convendría comparar la sensibilidad de la densidad (estimador de abundancia) con la simple área basal (estimador de biomasa) utilizada en general en los zacatales (Parker, 1954), para valorar los cambios estructurales causados por el patrón de pastoreo.

#### **Diferencias en el estado de la superficie del suelo entre levantamientos**

De los levantamientos llevados a cabo para estimar el estado de la superficie del suelo, cabe destacar que, de los tres sitios de agostadero coincidentes en los tres ranchos, los de EP registraron los valores medios más altos de suelo desnudo (Cuadro 4), por lo que este rancho presenta el mayor riesgo de erosión y desertificación de los tres ranchos evaluados. Sin embargo, la densidad y biomasa de las especies deseables en EP no fue la peor registrada, lo cual podría sugerir una tendencia hacia su recuperación. Cabe mencionar que la superficie del suelo de los sitios de agostadero del rancho LS destacó por presentar, en promedio, la menor área desnuda y la mayor área cubierta con vegetación de los tres ranchos estudiados. De la información de la cobertura actual de la superficie del suelo, las variables “suelo desnudo”, seguida por la porción ocupada con “vegetación” (equivalente al atributo estructural “área basal”), resultaron ser las más relacionadas con la condición, en concordancia con los antecedentes sobre ello (Lara-Juárez *et al.*, 2016; Bikila y Tessema, 2017; Aguirre-Rivera *et al.*, 2020).

### Ordenación multivariable de los atributos evaluados en los levantamientos

Del análisis multivariable aplicado a las variables de vegetación y cobertura del suelo evaluadas en cada sitio de agostadero, sólo el valor propio o característico de los dos primeros ejes de ordenación registró información significativa para su interpretación. Así, en el extremo izquierdo del primer eje (Figura 2) se pueden reconocer la densidad y la biomasa de las especies indeseables, la densidad de las especies menos deseables, la proporción de biomasa y densidad de especies deseables y la proporción de suelo desnudo. A la vez, en la parte superior del eje dos se ordenaron las variables más significativas para evaluar la condición (densidad y biomasa de las especies deseables e indeseables, la densidad de las especies menos deseables y la proporción de suelo desnudo), y en la parte inferior se ordenaron las variables que resultaron menos sensibles o importantes para evaluar la condición.

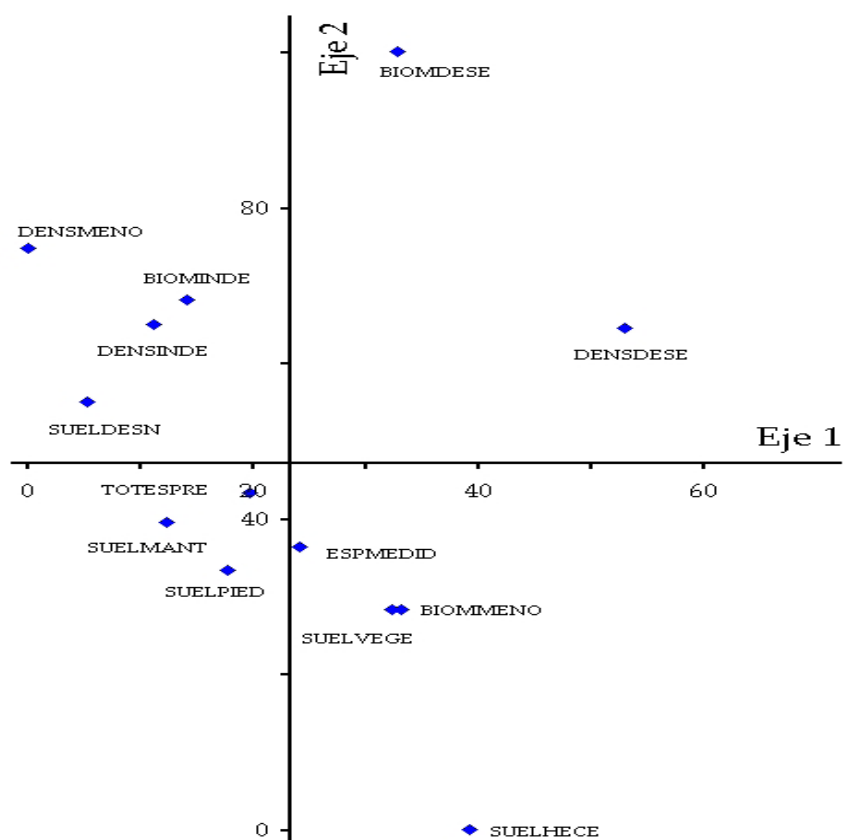
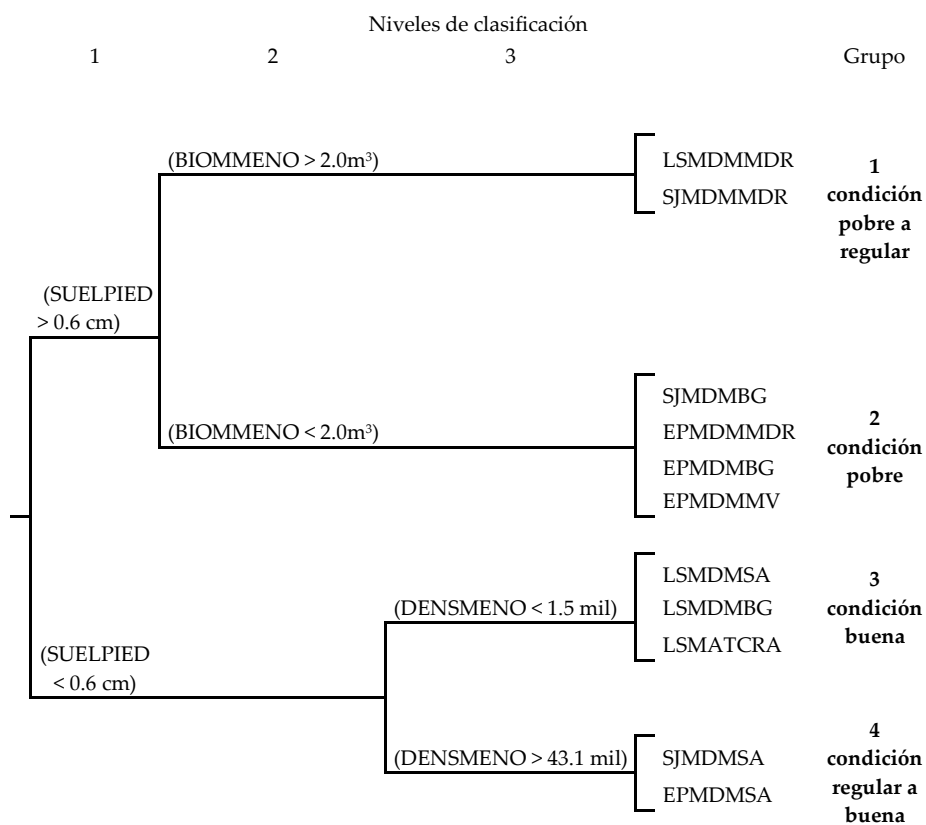


Figura 2. Ordenación bidimensional de las variables evaluadas en los sitios de agostadero de los ranchos estudiados.

Los resultados de la ordenación multivariable mediante DECORANA, diseñado inicialmente para ajustar datos ecológicos a partir de muestras y especies, fue también apropiado para determinar gradientes del comportamiento del conjunto de variables de vegetación y suelo evaluadas en este estudio y con ello establecer la condición de los diferentes sitios de agostadero multirramificados, sometidos a diferentes patrones de aprovechamiento. Estos resultados fueron coincidentes con los registrados por Aguirre-Rivera *et al.* (2020) en agostaderos semiáridos bajo manejo privado de 1993 a 2013 tras la parcelación de las áreas comunales del ejido El Castañón y Anexos, Catorce, San Luis Potosí. También son coincidentes con el patrón de gradientes descritos por Reyes-Agüero *et al.* (2005) y Mora-López *et al.* (2011).

### Clasificación de los sitios de agostadero evaluados

Se obtuvo la clasificación multivariable de los sitios de agostadero, con base en las variables evaluadas de vegetación y superficie del suelo (Figura 3). Los



**Figura 3.** Clasificación de los 11 sitios de agostadero evaluados en tres ranchos privados del Altiplano Potosino-Zacatecano en México.

11 sitios de agostadero se clasificaron en cuatro grupos compuestos por dos a cuatro sitios cada uno. La variable indicadora o causante típica de la primera dicotomía, fue la proporción de la superficie cubierta con piedras, la cual separó a los grupos 1 y 2 (seis sitios) de los grupos 3 y 4 (cinco sitios); así, el grupo 1 se conformó sólo con dos sitios de agostadero, correspondientes a la transición o ecotono entre los matorrales rosetófilos (típicos de litosoles cerriles) y los micrófilos, con mayor pedregosidad superficial que los restantes, y el tercer sitio de dicha transición se ubicó en el grupo 2, posiblemente por presentar peor condición que los dos anteriores.

La variable indicadora de la separación de los grupos 1 y 2, desde el nivel 2 de la clasificación, fue la biomasa de las especies menos deseables, y la diferencia entre ellos se debió a la condición más pobre de los sitios del grupo 2. En el nivel 3 de la clasificación se definieron los grupos 3 y 4, debido a la variable densidad de especies menos deseables, tal vez la variable más sensible de la vegetación al comienzo del deterioro de la condición. Así, el grupo 3 se formó con tres sitios de LS, el rancho con los agostaderos menos deteriorados de los tres estudiados, y el grupo 4 se conformó con los sitios mejor conservados de los ranchos SJ y EP, ambos con *Sporobolus airoides* como zacate dominante. Fue así como la clasificación multivariable de los sitios evaluados confirmó la validez de su reconocimiento como tales, pero a la vez mostró el efecto de la condición para generar afinidad o distancia entre ellos.

Para finalizar, anticipamos que con las variables evaluadas de vegetación y cobertura de suelo de este estudio y con los resultados mostrados, se tienen indicadores útiles para diseñar y establecer en esos agostaderos un sistema de producción animal en pastoreo rentable y persistente. También confirmamos que con la metodología utilizada: identificación de sitios con imágenes Landsat, clasificación supervisada, cuantificación ecológica de vegetación y suelo y análisis multivariable, es posible establecer la condición de agostadero en cualquier unidad de producción ubicada en zonas ecológicas similares y con presencia de matorrales multirramificados.

## CONCLUSIONES

El sitio y condición en agostaderos multirramificados fueron estudiados con la metodología ecológica cuantitativa (método tradicional) complementada con clasificación basada en tecnología y programación analítica (método actualizado), lo que resultó en la evaluación satisfactoria del estado de las tierras de pastoreo de los tres ranchos ganaderos privados estudiados del Altiplano Potosino Zacatecano. De acuerdo con la evaluación y clasificación de los 11 agostaderos estudiados, se obtuvieron cuatro grupos de condición, desde buena hasta pobre, con algunas transiciones entre los extremos.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Jaime Valle Méndez, a la IAZ María de los Ángeles Vega Calzada y al MVZ Herminio Gutiérrez Uribe, propietarios de LS, SJ y EP respectivamente, por su excelente disposición para apoyar el estudio realizado. Al Lic. Estardo Camacho Rosales por su ayuda en el trabajo de campo. Al personal del herbario del IIZD de la UASLP, por la identificación de los especímenes recolectados. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-CONACYT por la beca No. 230424, otorgada a L. O. Negrete S. para la realización de sus estudios doctorales. Al cuerpo editorial y árbitros de Agrociencia por su esmero y rigor propositivo en el tratamiento de la versión original.

## REFERENCIAS

- Aguirre-Rivera JR, Negrete-Sánchez LO, Castro-Rivera R. 2020. Effects of 20 years of parceling on the condition of communal rangeland on a Mexican ejido. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo* 52 (2): 189–203.
- Aldrete-Menchaca E, Aguirre-Rivera JR. 1982. Diferenciación de sitios y condición de agostaderos del noroeste del estado de Zacatecas. *Revista Chapingo* 7 (35–36): 53–58.
- Bikila NG, Tessema ZK. 2017. Effect of traditional rangeland management practices on vegetation structure and above ground biomass in East African semiarid rangelands. *FAO. Sustainable Pastoralism and Rangelands in Africa. Nature and Fauna* 31 (2): 31–35.
- Bolaños-Medina A, Aguirre-Rivera JR. 2000. Evaluación preliminar de los agostaderos forestales del occidente del Estado de México. *Acta Científica Potosina* 15 (2): 74–97.
- Canfield RH. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. *Journal of Forestry* 39 (4): 388–394.
- CONAZA (Comisión Nacional de Zonas Áridas). 1994. Manejo y rehabilitación de agostaderos de las zonas áridas y semiáridas de México: Región Norte. Comisión Nacional de Zonas Áridas. Saltillo, México. 116 p.
- Contreras-Hinojosa JR, Volke-Haller V, Oropeza-Mota JL, Rodríguez-Franco C, Martínez-Saldaña T, Martínez-Garza A. 2003. Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuitlán, Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 21 (3): 427–435.
- COTECOCA (Comisión Técnico-Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero). 1974. Coeficientes de agostadero de la República Mexicana, estado de San Luis Potosí. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Ciudad de México, México. 158 p.
- Cottam G, Curtis JT. 1956. The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology* 37 (3): 451–460.
- Dyksterhuis EJ. 1949. Condition and management of rangeland based on quantitative ecology. *Journal of Range Management* 2: 104–115.
- Easdale MH, Umaña F, Raffo F, Fariña C, Bruzzone O. 2019. Evaluación de pastizales patagónicos con imágenes de satélites y de vehículos aéreos no tripulados. *Ecología Austral* 29 (3): 306–314.
- Holechek JL, Galt D, Joseph J, Navarro J, Kumalo G, Molinar F, Thomas M. 2003. Moderate and light cattle grazing effects on Chihuahuan Desert rangelands. *Journal of Range Management* 56: 133–139.
- Holechek JL, Pieper RD, Herbel CH. 2011. *Range management, principles and practices* (6th Edition). Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA. 444 p.
- Holechek JL. 1991. Chihuahuan desert rangeland, livestock grazing and sustainability. *Rangelands* 13 (3): 115–120.
- Humphrey RR. 1949. Field comments on the range condition method of forage survey. *Journal of Range Management* 2: 1–10.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2007. Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Superficie total de las unidades de producción según uso del suelo, SLP. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=24#collapse-Tabulados> (Recuperado: diciembre 2022).

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2017. Cartas físicas temáticas. Temas: geológica, hidrología superficial, hidrología subterránea, edafológica, climatológica y vegetación y uso actual. San Luis Potosí, México.
- Lara-Juárez P, Castillo-Lara P, Tristán-Patiño F de M, Rendón-Huerta JA, Aguirre-Rivera JR. 2016. Range site and condition effects on “escamoles” ant (*Liometopum apiculatum* Mayr) nest density. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22 (3): 285–302. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.04.016>
- Lasanta T. 2010. Pastoreo en áreas de montaña: estrategias e impactos en el territorio. *Estudios Geográficos* 71 (268): 203–233. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.0459>
- McCune B, Mefford MJ. 2011. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data. Version 6.0 MjM Software, Gleneden Beach, OR, USA.
- Medina-García G, Gutiérrez-Luna R, Echavarría-Chairez FG, Amador-Ramírez MD, Ruíz-Corral JA. 2009. Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. *Técnica Pecuaria México* 47: 135–144.
- Mellink E, Valenzuela S. 1995. Efecto de la condición de agostaderos sobre los roedores y lagomorfos en el Altiplano Potosino, San Luis Potosí, México. *Acta Zoológica Mexicana* 64: 35–44.
- Mora-López JL, Reyes-Agüero JA, Flores-Flores JL, Peña-Valdivia CB, Aguirre-Rivera JR. 2011. Variación morfológica y humanización de la sección *Salmianae* del género *Agave*. *Agrociencia* 45 (4): 465–477.
- Negrete-Sánchez LO, Aguirre-Rivera JR, Pinos-Rodríguez JM, Reyes-Hernández H. 2016. Beneficio de la parcelación de los agostaderos comunales del ejido “El Castañón”, municipio Catorce, San Luis Potosí: 1993-2013. *Agrociencia* 50 (4): 511–532.
- Parker KW. 1954. Application of ecology in the determination of range condition and trend. *Journal of Range Management* 7 (1): 14–23.
- Pinos-Rodríguez JM, García-López JC, Aguirre-Rivera JR, Reyes-Hernández H. 2013. Participatory cartography in a traditional goat production system of a smallholder community in northern México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 16 (2): 215–222.
- Reyes-Agüero JA, Aguirre-Rivera JR, Flores-Flores JL. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) en relación con su domesticación en la altiplanicie meridional de México. *Interciencia* 30 (8): 476–484.
- Ruechel J. 2012. Grass-fed cattle: how to produce and market natural beef. Storey Publishing: North Adams, MA, USA. 384 p.
- Rzedowski RJ. 1957. Vegetación de las partes áridas de los estados de San Luis Potosí y Zacatecas. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 18: 49–101.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2021. Normales climatológicas por estación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional. Ciudad de México, México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=slp> (Recuperado: enero 2019).
- Solomon TB, Snyman HA, Smit GN. 2007. Cattle-rangeland management practices and perceptions of pastoralists towards rangeland degradation in the Borana zone of southern Ethiopia. *Journal of Environmental Management* 82 (4): 481–494. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.01.008>
- Tamayo JL. 2012. Geografía moderna de México (13a edición). Trillas: Ciudad de México, México. 486 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2013. Interagency ecological site handbook for rangelands. Washington, DC, USA. 220 p. <https://jornada.nmsu.edu/files/InteragencyEcolSiteHandbook.pdf> (Recuperado: enero 2021).
- Valentine JF. 1990. Grazing management. Academic Press: San Diego, CA, USA. 533 p.

## NETWORK STRUCTURE FOR THE MOBILITY OF BOVINES PRODUCED IN THE STATE OF CHIHUAHUA, MEXICO, 2010–2019

Nicolas Callejas-Juárez<sup>1</sup>, Graciela del Carmen Sandoval-Luján<sup>2</sup>, José María Salas- González<sup>2</sup>, Eduardo Domínguez-Arrieta<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Zootecnia y Ecología. Periférico Francisco R. Almada km 1, Chihuahua, Chihuahua, Mexico. C. P. 31453.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Contaduría y Administración extensión Delicias. Calle 6ª y Ave. 21 Poniente, Ciudad Delicias, Chihuahua, Mexico, C. P. 33000.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Sociología Rural. Carretera México- Texcoco km 38.5, Texcoco, State of Mexico, Mexico. C. P. 56227.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Contaduría y Administración Extensión Delicias. Calle 6ª y Ave. 21 Poniente, Ciudad Delicias, Chihuahua, Mexico. C. P. 33000.

\* Author for correspondence: eddoming@uach.mx

### ABSTRACT

The Social Network Analysis (SNA) is a tool for studying the structure and importance of livestock markets and their elements. The aim of the investigation was to analyze the network structure for the mobility of bovines produced in the state of Chihuahua, Mexico, between the 2010–2019 period. The Social Network Analysis methodology was used, with centrality measures at origin and destination centers taken into account. In the 2010–2019 period, the structure of bovine livestock mobility was determined by 67 centers of origin (producers) and 32 destination centers (consumers). Producers mobilized 10 012 227 heads with the intentions of exporting calves for fattening (39.2 %), pasturing (26.6 %), fattening (13.9 %), slaughtering (13.5 %) and auctioning, breeding stock, and events (6.7 %). These seven products, which comprised three destination markets: export, national, and local, determined the structure and mobility of bovine livestock. The main center of origin was the municipal area of Chihuahua, whereas the main destinations were the USA and the municipal area of Chihuahua, which are therefore considered the main elements of the network and key nodes of the dynamism of bovine livestock in the state. It was also possible to confirm that the export of calves for fattening was the main purpose of cattle mobility for the state of Chihuahua.

**Keywords:** Bovine traceability, calf export, weaned calves.

### INTRODUCTION

The Social Network Analysis (SNA) is a tool that is currently being applied for the analysis of the structure, performance, and importance of markets for supply, demand, sanitary control, and the planning of production. Unlike a marketing study, which analyzes commercialization channels and margins, SNA assists in identifying and quantifying the importance of each network element (Callejas-Juárez *et al.*, 2020;

**Citation:** Callejas-Juárez N, Sandoval-Luján G del C, Salas-González JM, Domínguez-Arrieta E. 2023. Network structure for the mobility of bovines produced in the state of Chihuahua, Mexico, 2010–2019.

*Agrociencia* 57(3): 622-653. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2742>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: April 13, 2022.  
Approved: February 15, 2023.  
**Published in *Agrociencia*:**  
April 13, 2023.

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



Callejas-Juárez and Rebollar-Rebollar, 2021). A cattle producer's primary concern will always be the market; under a traditional economic system, the producer relies on the market to acquire products after they are produced. Meanwhile, in the current market system, producers sell their products before they are produced. As a result, a polarizing tendency grows between the technological and family production systems (Jiménez-Jiménez *et al.*, 2019).

The importance of bovine production activity can be observed in the global beef market. In 2019, the value of global exports was \$25.4 billion USD, with Brazil accounting for 23.1 %; the USA, 13.0 %; and Australia, 14.9 %. In terms of demand, China imported 24.5 %; South Korea, 7.2 %; and Hong Kong, 6.2 % (The Growth Lab at Harvard University, 2019). The demand was clearly concentrated in Asia.

The importance of bovine livestock production in Mexico lies in the fact that it is widespread (Callejas-Juárez *et al.*, 2015) and accounts for the majority of farmland use (SIAP, 2020). In 2020, it produced 35.3 % of the country's beef (7.9 % less than poultry production). Its value is 43.1 % of the value of livestock production, and its inventory is worth a little over 35 million cattle heads. A little over 1.4 million cattle heads were exported (SIAP, 2020). Slaughterhouses sacrifice just over 1.1 million heads per year, with only 52.2 % of their capacity used (SADER, 2020). The structure of the bovine livestock in Mexico is composed of 45.3 % cows, 26.3 % animals in growth, 11.9 % heifers, 11.5 % fattening heads, 3.0 % bulls, and the rest is not classified (INEGI, 2019). Chihuahua, Mexico, has the most surface area in the country, accounting for 12.0 % of the total (INEGI, 2019). The cow-calf production system is developed on 17.5 million hectares of pastures and scrublands (Baez-González *et al.*, 1999). In 2020, Chihuahua had a bovine inventory of over 2.5 million cattle heads, providing 1.6 % of the volume of meat produced in the country, equivalent to 2.2 % of the national livestock value (SIAP, 2020). It is also the state that exports the most calves for fattening to the USA, with 479 100 heads (SDR, 2020). Locally, the bovine production activity represented 91.6 % of the volume of meat produced in the state and 94.4 % of the total production (SIAP, 2020).

According to Callejas-Juárez *et al.* (2015), the technological degree of meat bovine production in Chihuahua is determined by productivity variables such as herd mortality ( $4.0 \pm 1.5$  %), percentage of calving ( $68.8 \pm 6.3$  %), cull cows ( $8.8 \pm 3.0$  %), cull bulls ( $13.0 \pm 11.2$  %), production of meat per hectare ( $88.7 \pm 7.8$  kg ha<sup>-1</sup>), production cost ( $1742.4 \pm 947.6$  \$ MXN cow<sup>-1</sup>), and income ( $176.2 \pm 123.7$  \$ MXN ha<sup>-1</sup>,  $2613.0 \pm 1440.8$  \$ MXN fattening calf<sup>-1</sup> and  $16.0 \pm 8.5$  \$ MXN kg of calves for fattening<sup>-1</sup>), which explain the export volumes of bovine livestock to the USA.

The goal of the Social Network Analysis (SNA) method is to measure the importance of the network's centrality nodes and prestige (Knoke and Burt, 1983) using metrics such as grade, proximity, intermediation, eigenvector, cumulative nomination, and others (Xiao, 2013). Individuals, organizations, and companies are nodes in the network, and centrality is used to measure the power, activity, and ease of communication of these nodes (Zhang and Luo, 2017). In Mexico, the use of the SNA in livestock production

systems is just getting started. Callejas-Juárez *et al.* (2020) analyzed the structure of the supply network of live pigs in Mexican slaughterhouses and found a low density in the network. In another study, Callejas-Juárez and Rebollar-Rebollar (2021) discovered that the distribution of live bovine meat in Mexico had a low degree of centralization due to the dependence of demand for consumption centers (slaughterhouses) on local supply.

Due to the above, the aim of this investigation was to analyze the network for the mobility of bovines produced in Chihuahua during the 2010–2019 period in order to generate information to explain the structure of bovine production in Chihuahua. In turn, the hypothesis is that the state's proximity to the USA makes it the main market for calve exports and that the municipal area of Chihuahua is the network's most central element.

## MATERIALS AND METHODS

We worked with the population of bovines (N) produced in the state of Chihuahua, Mexico, for each study variable in the 2010–2019 period. The variables analyzed were the total volume of bovines mobilized per municipal area ( $V_i$  = heads), supply or origin of the production ( $X_i$  = 67 municipal areas), demand or production destination ( $Y_i$  = 29 federal entities of Mexico) and the use or purpose ( $z_1$  = fattening,  $z_2$  = export,  $z_3$  = breeding stock,  $z_4$  = pasturing,  $z_5$  = sacrifice,  $z_6$  = auctioning, and  $z_7$  = exhibition/event/show). Data on the amount, origin, and destination of bovines were obtained from the Chihuahua state government's Secretariat of Rural Development (SDR, 2020), and the volume produced from the Agricultural and Fisheries Information System (SIAP, 2020).

To respond to the objective, three types of analyses were required: to study the trends of bovine livestock mobilizations with the average annual growth rate (AAGR), to analyze the bovine livestock mobilization network with network measurements, and to analyze the network tendencies. The estimated average values are presented along with their standard deviations ( $\bar{x} + SD$ ). The network structure and relationships were developed and evaluated using the SNA theory proposed by Wasserman and Faust (1994) and Borgatti and Halgin (2011) through measures of density, cohesion, centrality, and graphic analyses. The network figures were obtained using the software UCINET developed by Borgatti *et al.* (2002).

The order of the network analyzed (m) contained 67 municipal areas as supply centers in the state of Chihuahua and 29 federal entities plus the USA as destination centers, whereas size (n) was in the range of 233 to 460 commercial relations, out of 2144 possible ones. The breeding stock distribution network  $A(I, J)$  was made up of output centers ( $\alpha_i$ ), input centers ( $\alpha_j$ ) and commercial exchanges ( $\alpha_{ij}$ ) resulting from the intersection of  $\alpha_i$  with  $\alpha_j$ . For better management,  $A(I, J)$  was dichotomized, assigning a 1 to the vertex that had a commercial exchange ( $\alpha_{ij} - 1$ ) and 0 assigned in the opposite case ( $\alpha_{ij} - 0$ ). Because the commercial exchange was carried out in only one direction (origin-destination), the network was directed and the importance of the vertices was

determined by the number of commercial relationships and the volume of heads of cattle mobilized (Table 1).

**Table 1.** Possible and existing nodes of the bovine network in the state of Chihuahua during the 2010–2019 period.

Year	Existing exchanges ( $D_{ij} \neq 0$ )	Destination centers ( $\alpha_j$ )
2010	233	23
2011	354	28
2012	460	29
2013	420	28
2014	342	26
2015	238	25
2016	303	26
2017	302	29
2018	291	27
2019	286	27

To analyze  $A(I, J)$ , degree measurements were used, along with proximity and intermediation (Freeman *et al.*, 1979) and eigenvector centrality (Bonacich, 1987). The centrality degree of a network ( $G_{ij}$ ) is the sum of the existing commercial relations in the network, whereas the average degree ( $\bar{G}_{ij}$ ) is obtained as the quotient of  $G_{ij}$  between the total of possible nodes (N) (Equation 1). This indicator was obtained for each element of the network, as well as for the total network.

$$G_{ij} = \sum_j \alpha_{ij}; \bar{G}_{ij} = \frac{G_{ij}}{N} * 100 \quad (1)$$

The output degree ( $G_i$ ) is the number of commercial relations in a supply center, whereas the input degree ( $G_j$ ) is the number of commercial relations received by the destination centers (Equation 2).

$$G_i = \sum_{i=1}^{30} \alpha_{ij}; G_j = \sum_{j=1}^{67} \alpha_{ji} \quad (2)$$

The density percentage ( $D$ ) measured the quotient of the number of commercial relations carried out ( $m$ ) between the number of possible commercial relations ( $n-1$ ) (Equation 3). The two possible results are that  $D \leq 100\%$ .

$$D = \frac{m}{n-1} * 100 \quad (3)$$

The node intermediation ( $B$ ) is a network measurement that indicates the percentage of marketing routes that cross a node, thus representing the link between two nodes and being one of the main sources of information in the network. This intermediation work is common among conventional producers who lack the ability to commercialize directly due to their production scale (Méndez-Cortés *et al.*, 2019). Intermediation is obtained as the quotient of the sum of the shortest routes that cross the vertices ( $V$ ) and the sum of the shortest paths between the vertices ( $S$ ) (Equation 4).

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{v}{s} \quad (4)$$

Proximity ( $R$ ) is a measurement of the position or accessibility of one actor in the network which indicates how many actors the product must cross to reach another actor or all actors in the network (Equation 5).

$$R = \frac{n-1}{\sum_{i=1}^n d} \quad (5)$$

The eigenvector centrality ( $E$ ) is a relative measure that represents the position or importance of each node and its relation with well-positioned nodes in the network. It measures the quality or importance of each node (Equation 6).  $E_i$  is the proportion of the eigenvalue of  $A$  multiplied by the sum of vectors adjacent to the supply center, whereas  $E_j$  is in relation to the consumption center:

$$E_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \quad (6)$$

where  $x_i / x_j$  indicates the centrality of the node  $i/j$ ,  $\alpha_{ij}$  represents an input of the adjacency matrix ( $A$  ( $\alpha_{ij}$ ) = 1 if nodes  $i$  and  $j$  are connected by an edge and ( $\alpha_{ij}$ ) = 0 in the opposite case) and  $\lambda$  indicates the highest own value of  $A$ .

According to Wasserman and Faust (1994), the social capital (SC) is a measure of how the elements of the network communicate (information) to benefit or harm the components (Equation 7). The social capital exists as a complement to the human capital (Burt, 2000). A triad is the closed relationship between three elements of the network.

$$CS = \frac{3 * \sum_{i=1}^n \text{Triadas existentes}}{\sum_{i=1}^n \text{Triadas posibles}} \quad (7)$$

Finally, homophily ( $H$ ) is a measurement that indicates the preference of supply centers for the mobilization of cattle over consumption centers and vice versa (Equation 8). It

is calculated as the difference of the sum of the cattle mobilized outside (GMO) and the sum of the cattle mobilized inside (GMI) by the total of cattle mobilized ( $GMT = GMI + GMO$ ).

$$H = \frac{GMO - GMI}{GMT} \quad (8)$$

The bovine livestock mobility system will have a higher homophily as the proportion of heads of cattle consumed in national and local markets grows. However, cattle mobilization to the USA market will be more desirable due to better prices in the market.

## RESULTS AND DISCUSSION

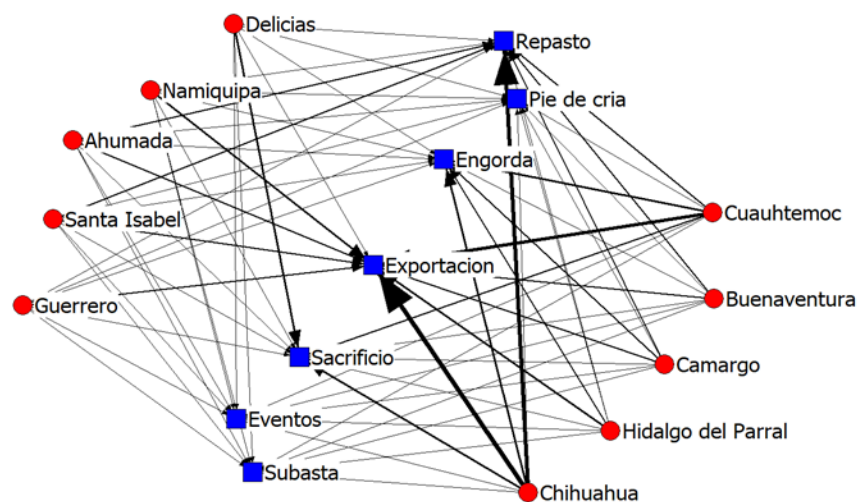
During the analysis period (2010–2019), 10 012 227 bovine livestock heads were mobilized in 67 centers of origin (municipal areas) of the state of Chihuahua, which had  $26.8 \pm 1.9$  destination markets, grouped into three classes: international (39.2 %), local (32.7 %) and national (28.1 %). However, the bovine livestock with pasturing as their destination were later sent to export, thus reaching 65.9 % of the cattle mobilized. By cattle type, 42.5 % were calves for fattening; 19.6 %, calves; 15.5 %, cows; 10.4 %, heifers; 6.9 %, steers; 2.5 %, bulls; 2.4 % young bulls, and 0.1 %, calves. In turn, there were seven purposes for the mobilization of cattle: export, pasturing, fattening, sacrifice, auctioning, breeding stock and exhibition (39.2, 26.6, 13.9, 13.5, 5.6, 0.7, and 0.4 %, respectively). The markets and purposes have helped to increase the degree of integration with the American market and to remain as the main source of weaning and pasturing calves. Something similar occurs with the bovine livestock industry in Sonora, where the export calves production has remained stable over the last years (Moreno-Medina *et al.*, 2021).

The network dynamics due to the mobilization of cattle helped identify two destination groups: the first, composed of pasturing, export, fattening, and sacrifice; the second group, by events, auctioning, and breeding stock. The dynamics of mobilization per cattle type showed that the cattle mobility fluctuated in a different way: for young bulls, it increased 6620.6 %; heifers, 79.9 %; calves, 40.7 %; cows, 33.7 %, and calves for fattening, 12.4 %. In turn, the mobilization of calves, steers and bulls fell by 98.7, 94.6 and 6.5 %, respectively. The dynamic of the meat bovine network is supported more by the production of weaning and pasturing calves intended for export to the USA than by the production of meat to supply the local market. Meat production in the state of Chihuahua is measured by the number of calves, which are considered the main output of the cow-calf system, whereas the demand for resources is complemented by the structure of the herd, such as cows, bulls, and heifers.

During the analysis period, 39.2 % of the 10 012 227 cattle heads mobilized were shipped to the USA market, 32.7 % to the local market, and 28.1 % to the national market. Likewise, the national and international markets increased their participation by 21.1 and 7.6 %, respectively, whereas the local market decreased 1.4 %. Despite this,

the dynamism for the local, national, and international markets was not significant ( $p = 0.182$ ). For the main market (international), the volumes exported yearly were different ( $p = 0.425$ ). This supports the hypothesis that the beef production system in Chihuahua is becoming increasingly dependent on the US market, whereas the non-exported calves for fattening were mobilized to the national and local markets. In the 1970–2011 period, the price of calves for export increased by 42.5 %, whereas the increase in the national market was only 18.4 %, disincentivizing the production of national meat (Cruz-Jiménez and García-Sánchez, 2013).

In this sense, destination markets were important to define the structure of the bovine livestock industry in the state. The first group was composed of cattle heads taken from the state for export, pasturing, and sacrificial purposes (9 337 744 cattle heads, 93.3 %). For export purposes,  $94.0 \pm 2.3$  % of the centers of origin mobilized 3 928 472 (39.2 %) cattle heads; the five most important centers of origin accounted for 39.8 %: Chihuahua  $24.9 \pm 3.3$  %, Cuauhtémoc  $11.5 \pm 1.5$  %, Hidalgo del Parral  $5.4 \pm 0.8$  %, Namiquipa  $4.8 \pm 0.8$  %, and Santa Isabel  $4.5 \pm 1.9$  %. For pasturing purposes, 100 % of the centers of origin mobilized 2 665 607 cattle heads; the five most important municipal areas accounted for  $39.8 \pm 3.9$  %: Chihuahua  $24.9 \pm 3.3$  %, Madera  $4.3 \pm 2.0$  %, Santa Isabel  $3.7 \pm 0.08$  %, Guadalupe y Calvo  $3.6 \pm 0.8$  %, and Balleza  $3.2 \pm 0.8$  %. For fattening purposes,  $88.8 \pm 12.5$  % of the centers of origin mobilized 1 390 722 cattle heads; the five most important centers of origin accounted for 50.1 %: Chihuahua  $17.8 \pm 2.7$  %, Cuauhtémoc  $16.6 \pm 7.3$  %, Hidalgo del Parral  $6.3 \pm 2.6$  %, Camargo  $4.9 \pm 2.8$  %, and Delicias  $4.4 \pm 2.8$  %. Finally, for slaughtering purpose,  $97.5 \pm 2.5$  % of the centers of origin mobilized 1 352 943 cattle heads and the five most important centers provided 56.5 %: Chihuahua  $17.9 \pm 5.1$  %, Delicias  $16.8 \pm 3.6$  %, Cuauhtémoc  $11.1 \pm 2.5$  %, Saucillo  $6.6 \pm 1.7$  %, and Riva Palacio  $4.1 \pm 1.1$  % (Figure 1).



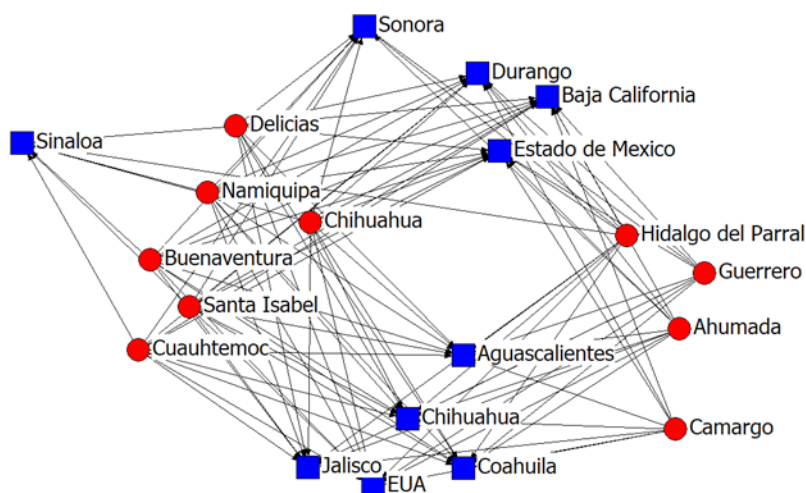
**Figure 1.** Network by mobilization purpose of bovine livestock in the state in Chihuahua in the 2010–2019 period.

The second destination group was composed of the purposes of auctioning, reproduction, and events within the state of Chihuahua, representing 6.7 % of the total mobilized in the analysis period. With the purpose of auctioning,  $88.4 \pm 5.9$  % of the centers of origin mobilized 564 120 heads of cattle and the five most important municipal areas mobilized 34.4 %: Satevó  $7.3 \pm 1.9$  %, Chihuahua  $6.5 \pm 2.6$  %, Guerrero  $6.2 \pm 1.5$  %, Santa Isabel  $5.3 \pm 2.1$  %, Huejotitán  $4.5 \pm 1.4$  %. For the purpose of breeding stock,  $45.4 \pm 10.4$  % of the centers of origin mobilized 70 328 heads of cattle; the five most important municipal areas mobilized 79.1 %: Juárez,  $25.6 \pm 31.2$  %, Chihuahua  $24.8 \pm 13.0$  %, Delicias  $15.7 \pm 15.7$  %, Santa Isabel  $7.9 \pm 10.4$  %, and Saucillo  $5.1 \pm 9.0$  %. Except for Chihuahua, which mobilized cattle for the production of beef, the other centers of origin mobilized for the production of milk. Finally, for the purpose of events, exhibition or shows,  $54.8 \pm 12.0$  % of the centers of origin mobilized 40 035 heads of cattle; the five most important centers of origin mobilized 46.9 %: Chihuahua  $21.9 \pm 5.7$  %, Cuauhtémoc  $14.6 \pm 10.9$  %, Santa Isabel  $5.0 \pm 4.2$  %, Guerrero  $2.9 \pm 2.0$  %, and El Tule  $2.4 \pm 3.6$  %. This implies that the bovine livestock activity in Chihuahua is aimed at the markets outside of the state, mainly for the export of calves. The vegetation's poor situation and low production indicators of cattle ranches confirm this (Baez-González *et al.*, 1999).

The annual supply and type of cattle vary by municipal area in Chihuahua. As a result, the average number of mobilized bovine livestock during the study period was not statistically different between years ( $p = 0.997$ ), but it was between cattle types ( $p < 0.001$ ). All the centers of origin marketed breeding stock every year. However, not all municipal areas marketed with all destinations every year. On average, the centers of origin mobilized bovine livestock every year in an interval of 25.2 to 28.4 destination centers. This means that, with the exception of the USA, the state of Chihuahua marketed bovine livestock with every state in Mexico, except for five which, due to the amount sent (less than 10 heads of cattle in 10 years), were considered negligible (Baja California Sur, Guerrero, Campeche, Quintana Roo, and Mexico City).

### Origin-destination

The structure or importance of stockbreeding in Chihuahua was determined by the importance of volume and market information. The two most important destinations for cattle mobilization received 87.7 % of the cattle mobilized (Chihuahua 48.5 % and USA 39.2 %), whereas the third place was Baja California with 6.7 % of the total; the remaining 29 destinations concentrated only 5.6 % of the bovines mobilized. On the other hand, the participation in the municipal market of Chihuahua, as a destination, grew 8.7 % during the analysis period, whereas the USA's decreased 8.4 %. Practically, Chihuahua won over the market directly from the USA, since it has the roles of both a supply center and an intermediary, as 100 % of the centers of origin used the municipal area of Chihuahua as an intermediary. On the other hand, the places of origin also reduced their shipments to Baja California, since they found a better alternative in the export market (Figure 2).



**Figure 2.** Main origins (red) and destinations (blue) of the bovine livestock in the state of Chihuahua during the 2010–2019 period.

It is clear that the importance of the bovine livestock production in Chihuahua is relevant in almost all national and international markets. However, in the case of the national market, 67.0 % of the calves are sent to Baja California. As a result, Chihuahua is primarily reliant on two markets: the USA and Baja California. In this sense, the beef market in Mexico presents a low mean density of connections between producers and slaughter centers, indicating market inefficiency (Callejas-Juárez and Rebollar-Rebollar, 2021). The relationship between Chihuahua and the latter only represented 1.0 % of the total number of bovine cattle heads mobilized in the period of analysis.

### Networks

Through its indicators, the SNA helps visualize, measure, and analyze the position of municipal supply, international, state, and local demand, as well as the types of products in the network structure. The mobilization network for the bovine livestock produced in the state of Chihuahua was characterized by 100 % of municipal areas mobilizing cattle during the period of analysis. On average, the network made offers to  $26.8 \pm 1.9$  out of 29 destination centers, beginning with 23 in 2010 and reaching a maximum of 29 in 2012 and 2017. Even when all the supply centers mobilized cattle, the two main centers were the municipal areas of Chihuahua and Cuauhtémoc. Meanwhile, the municipal area of Chihuahua and the USA were the two most important two destination centers due to their demand.

This can be observed in the three most important SNA measurements to determine the structure of the network. In the period of analysis, the network performed 812 movements out of the 2144 possible ones. The output centers had an average degree of activity of  $17.9 \pm 38.4$  %, a network proximity of  $51.7 \pm 1.7$  %, and a characteristic vector

of  $12.7 \pm 0.7$  %. On the other hand, the input centers had an average degree of activity equal to that of the output centers, a proximity of  $78.3 \pm 1.1$  % and a characteristic vector of  $11.4 \pm 0.2$  %.

The analysis of the 10 most important municipal areas for their supply and the three SNA measurements showed that, for the centers of origin, the range of the network degree was from 3.0 to 100 %: 25 % of the supply centers had a degree of up to 22.0 %, 50.0 % up to 34.0 %, 75.0 % up to 26.0 %, and only Chihuahua had a degree of 100 %. One measurement of the power of the network was the degree of proximity, which was in the range of 73.0 to 100 %: 25.0 % of the centers of origin had a degree of proximity of up to 77.0 %, 50.0 % of up to 80.0 %, 75.0 % up to 85.0 %, and only Chihuahua reached a degree of 100 %. In turn, the range of the measurement of the characteristic vector was from 1.0 to 21.0 %: 25.0 % of the centers of origin had a measurement of the characteristic vector of up to 8.0 %, 50.0 % of up to 11.0 %, and 75.0 % up to 16.0 %. Another measurement of power in the network is the degree of intermediation to keep it together, which was, on average,  $0.68 \pm 1.6$  %; the center of origin with the highest measurement was Chihuahua with 11.7 % and Juárez with 5.0 % (Table 2).

**Table 2.** Measures of centrality for the origin centers of bovine livestock in the state of Chihuahua during the 2010–2019 period.

Supply center	Degree	Proximity	Characteristic value	Intermediation
Chihuahua	1.00	1.00	0.21	0.12
Santa Isabel	0.78	0.92	0.18	0.03
Juárez	0.78	0.92	0.19	0.05
Camargo	0.75	0.91	0.17	0.02
Hidalgo del Parral	0.72	0.90	0.18	0.01
Buenaventura	0.72	0.90	0.18	0.01
Cuauhtémoc	0.66	0.88	0.18	0.03

For destination centers, the degree range went from 7.0 to 100 %: 25.0 % of the destination centers had a range of up to 13.5 %, 50.0 % up to 33.5 %, 75.0 % up to 55.0 %, and only Chihuahua reached a degree of 100 %. Likewise, the degree of proximity had a range of 51.0 to 100 %: 25.0 % of the destination centers had a maximum degree of proximity of 53.0 %, 50.0 % of up to 59.0 %, 75.0 % of up to 68.0 %, and only Chihuahua reached a degree of proximity of 100 %. As in the centers of origin, the characteristic value of the destination centers was low, with a range of 3.0 to 32.0 %: 25.0 % of the destination centers reached a characteristic vector measurement of 6.25 %, 50.0 % up to 15.0 %, and 75.0 % up to 22.7 %. The degree of intermediation for the destination centers was  $2.8 \pm 8.8$  %. In this case, for Chihuahua, it was 44.4 %, for the USA, 24.3 %, and for Baja California, 6.5 % (Table 3).

The measurement of the degree of the destination centers reveals the high quality of the cattle mobilized by the centers of origin, with the variables that explain this

**Table 3.** Measures of centrality for the destination centers of the bovine livestock in the state of Chihuahua during the 2010–2019 period.

Destination center	Degree	Proximity	Characteristic value	Intermediation
Chihuahua	1.00	1.00	0.32	0.18
USA	0.94	0.94	0.31	0.13
Baja California	0.82	0.84	0.30	0.07
Durango	0.81	0.83	0.30	0.06
Aguascalientes	0.67	0.75	0.26	0.04
Coahuila	0.63	0.72	0.25	0.04
Chiapas	0.58	0.70	0.23	0.04
Sonora	0.55	0.68	0.23	0.03
Querétaro	0.55	0.68	0.22	0.03
Mexico City	0.52	0.67	0.22	0.02

being the cattle breeds, the position in the market (due to the export of calves for weaning), and the TB-free sanitary situation. According to the findings by Carmona-Martínez *et al.* (2007), 100 % of the producers surveyed bought recorded cattle, which has improved the genetic quality of their herd by 3.7 %. The greatest centrality of the state of Chihuahua, as the center of origin (Table 2) and destination (Table 3), explains its importance in the entire mobility network and positions it as the most influential in terms of receiving and spreading information about the local, national, and international markets.

Homophily is a SNA indicator that strengthens the indicators of centrality and density in the network structure. Identifying the network elements with the highest homophily also aids in understanding the reason for the relationship between centers of origin (municipal areas) and destination centers (markets). The homophily of exports and the local and national markets were, on average,  $-33.0 \pm 41.4$  %; 25.4 % of supply centers presented a positive homiphilia (17.613.1 %) and 74.6 %, a negative homophily ( $-50.2 \pm 32.6$  %). Out of the latter, four centers of origin presented complete homophily (-100 %). On the other hand, the homophily of the local and national market was  $15.8 \pm 44.5$  %; 70.1 % of the supply centers presented positive homophily ( $39.8 \pm 22.8$  %), and 29.9 % negative homophily ( $40.6 \pm 29.4$  %). A low proportion of homophily in centers of origin and destination was related to high quality in the mobilized cattle (mainly calves for export), whereas for the rest of the cattle mobilized, except for dairy cows, the proportion of cattle consumed in the centers of origin was low. This indicator adds to the aim and hypothesis of the investigation that the bovine cattle industry of the state of Chihuahua has an affinity for outside markets.

Finally, the last measure that defines the structure of a network is the social capital (SC), which is defined as the degree of association of knowledge between farmers that helps in the better utilization of human, financial, and natural resources of the livestock production systems (Macías-López *et al.*, 2019). The SC of the network was  $51.4 \pm 5.1$  %, although it displays a tendency to decrease (6.8 %). This is due to the municipal area

of Chihuahua increasing its participation as an intermediary in the export of calves for fattening to the USA through the Regional Livestock Union of Chihuahua (*Unión Ganadera Regional de Chihuahua - UGRCH*). In the case of the production of calves, in the face of a higher dependence on one single buyer (USA = 39.2 %) and a higher dependence on a local market (Chihuahua = 48.5 %), the flow of information decreases as a condition for decision-making.

### Analysis

The centers of origin, the seven purposes for cattle mobilization, three markets, and the destination centers defined the structure of bovine cattle mobility from Chihuahua. The centers of mobility (origin and destination) had a low variation (32.5–18.0), indicating that the centers had similar activity due to a high rate of dependence or commercial loyalty between them.

An important fact that changed the tendency for cattle mobilization was the frost that fell in (with temperatures of down to  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), which brought a series of negative externalities in the inventory and the mobility of bovine cattle, mainly cattle for beef. The 2011 frost affected 15 municipal areas of Chihuahua. Along with the 2011–2012 drought, it affected more than seven million hectares of crops and losses of over 4 billion \$ MXN (Brito-Castillo and Pedrozo-Acuña, 2015). In the 2010–2012 period, the volume of mobilized cattle increased by 42.3 %, but fell to 39.4 % in 2012–2014, eliminating the growth of the previous period.

In 2019, the mobility of bovine cattle displayed some recovery and was only 1.4 % below the export of calves for fattening, which displayed a negative TCMA between 2010 and 2013 of 24.3 %, followed by a positive TCMA of 53.9 %. However, the purposes of the mobilization with negative TCMA were fattening (72.1 %), slaughtering (53.8 %), pasturing (43.0 %), auctioning (28.0 %), and export (7.5 %); whereas exhibition and breeding stock increased (35.0 and 107.7 %, respectively). Starting in 2014, all mobilization purposes had positive TCMA, except exhibitions, (1.1 %): breeding stock, 251.6 %; fattening 249.7 %, auctioning, 46.0 %; export, 40 %; slaughtering, 16.5 %; and pasturing, 3.5 %.

The network structure was determined by 100 % of the municipal areas of the state of Chihuahua, yet the municipal area of Chihuahua represented the central element that controlled local, national and international information. Meanwhile, bovine production in the state of Chihuahua has commercial relations with all other states in Mexico, although it had two central elements—Chihuahua and the USA— which determined the structure of the destination centers. The network was determined by at least 50.0 % of the cattle mobilizations in the state of Chihuahua, and removing it from the network would cause all centers of origin to become disconnected. Likewise, a strong dependence on the export market (39.7 %) improved productivity.

For the analysis period, four municipal areas concentrated 36.2 % of the mobilized bovine cattle in the state. However, out of every 100 heads mobilized, almost 20 (19.6 %) travelled through the municipal area of Chihuahua (state capital). For

the two main centers of origin, a variable that explained the importance of the state capital was the Regional Livestock Union, which carries out weekly auctions, whereas for Cuauhtémoc, it was attributed to its geographic location with access to the Sierra of Chihuahua and its role as a collection center. Thus, the main destination of bovine cattle mobility in Chihuahua is two consumption centers, the state capital and the export market in the United States, which together demanded 88.2 % of the bovines mobilized. The third most important destination was Baja California, which demanded an average of 6.4 % of the bovines mobilized. Furthermore, when the export market for fattening calves shrinks, this destination absorbs them, as was the case in 2012 and 2016 (Table 4). Unlike Chihuahua, which had long-distance livestock mobilizations (Chiapas at 2248 km and Jiménez-Ciudad Juárez at 584 km), Robinson and Christley (2007) discovered that in England, cattle were mostly transported to nearby destinations or to local markets, which may be due to market structure.

**Table 4.** Origin and destination of the mobilization of bovine livestock from the state of Chihuahua (in percentages).

Year	Origin				Destination			
	O1	O2	O3	O4	D1	D2	D3	D4
2010	20.1	8.3	3.3	3.6	46.7	46.1	4.9	2.4
2011	23.9	9.1	4.7	2.6	47.6	34.8	11.1	6.6
2012	20.9	9.3	4.6	3.7	44.5	29.1	14.7	11.7
2013	19.3	9.6	4.4	3.9	48.1	33.4	10.5	7.9
2014	19.5	8.5	4.3	4.3	46.0	44.4	4.7	4.9
2015	18.8	8.2	4.6	3.3	50.5	42.7	3.5	3.3
2016	19.0	7.8	3.5	3.5	51.6	38.9	5.0	4.5
2017	18.1	9.5	3.6	3.7	50.0	42.2	3.6	4.1
2018	18.6	9.5	3.3	4.3	49.5	42.9	3.1	4.5
2019	18.0	9.3	3.5	4.2	50.7	42.2	3.2	3.9

O1: Chihuahua; O2: Cuauhtémoc; O3: Hidalgo del Parral; O4: Namiquipa; D1: Chihuahua; D2: USA; D3: Baja California; D4: others.

Only 3.1 % of the centers of origin (supply) had a probability of over 75.0 % of relating to all the destination centers (demand), 15.6 % less than 25.0 %, and 81.3 % between 25.0 to 75.0 %. Likewise, 96.9 % had a probability between 25.0 and 75.0 % of relating to all centers of origin, 3.1 % less than 25.0 %, and none higher than 75.0 %. Therefore, the density of the network is considered low, since it had an efficiency of 40.0 %, which was reflected in low centrality degree and measurement of the characteristic vector values, unlike the measurement of proximity, which was relatively high for the output centers, and medium for the input centers. The most important variable to explain this density was the high centrality of the municipal area of Chihuahua as a destination center, since it has commercial relations with the 67 centers of origin, with the 32 states of Mexico and the market of the USA.

The high degree of centrality of the municipal area of Chihuahua (center of origin) implies that it has a stronger relationship with the mobility of bovine livestock, both as a supply center and a destination center, and because it has the highest degree of proximity and intermediation, it becomes the ideal channel of information to broadcast information to the other municipal areas, even more than to the export market. Variables such as the Livestock Union, its position as the state capital, being the center of communication, offering auctions, and being the most important collection center in the state make it the ideal channel for the establishment and dissemination of public policies. The second most important supply center was Cuauhtémoc, being the main entrance to, or exit from, the Sierra de Chihuahua and having the second most important collection center in the state. Finally, Chihuahua was the main center of origin for mobilizing bovines for export, pasturing, fattening, and sacrifice, while Satevó was the main center for auction events. However, a problem with centrality is that it promotes epidemiological communication (Brieger and Kendall, 1996).

Homophily indicates a medium dependence of supply centers on local and national markets; that is, supply centers prefer the national market because the homophily of the local market is low, and it is related to supply centers finding better alternatives in national and export markets than in the local market. The importance of the municipal area of Chihuahua as a destination center for 100 % of the centers of origin has contributed to the formation of social capital, which is practically at 50.0 % and is supported by the continuous information received by the network of the market, composed of the 67 centers of origin and international through the export of fattening calves. Two aspects of social capital are information and reciprocity (García-Valdecasas, 2011), which can be seen, due to their volume of mobilization, in three elements of the network (USA-Municipal area of Chihuahua-Baja California) of Chihuahua bovines. These results highlight the importance of analyzing the distribution network for live cattle, which not only helped identify the main centers of origin, the main destination centers, the relationship between centers of origin and destinations, but also the transfer of the information generated in the network which helps the network elements make decisions.

## CONCLUSIONS

The methodology of the network analysis helps identify and analyze the structure of the bovine livestock in the state of Chihuahua. The structure of the mobility of bovine livestock in Chihuahua is determined by four products and three markets. Similarly, the USA and the municipal area of Chihuahua are the main components of the network and are critical to the dynamism of cattle breeding in the state of Chihuahua. Finally, to speak of bovine livestock breeding in the state of Chihuahua is to speak of the production of calves for fattening and mobilization out of the entity.

## REFERENCES

- Baez-González AD, Reyes-López G, Melgoza-Castillo A, Royo-Márquez M, Carrillo-Romo R. 1999. Características productivas del sistema vaca-cría en el estado de Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 37 (2): 11–24.
- Bonacich P. 1987. Power and centrality: a family of measures. *American Journal of Sociology* 92 (5): 1170–1182. <https://doi.org/10.1086/228631>
- Borgatti SP, Everett MG, Freeman LC. 2002. UCINET for Windows: Software for social network analysis. Analytic Technologies. Harvard, MA, USA. <https://sites.google.com/site/ucinetsoftware/home>
- Borgatti SP, Halgin DS. 2011. On network theory. *Organization Science* 22 (5): 1168–1181. <https://doi.org/10.1287/orsc.1100.0641>
- Brieger WR, Kendall C. 1996. The Yoruba farm market as a communication channel in guinea worm disease surveillance. *Social Science and Medicine* 42 (2): 233–243. [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(95\)00098-4](https://doi.org/10.1016/0277-9536(95)00098-4)
- Brito-Castillo L, Pedrozo-Acuña A. 2015. Inundaciones, heladas e incendios forestales. In Cavazos T. (ed.), *Conviviendo con la Naturaleza: El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México*. Ediciones ILCSA: Tijuana, Mexico, pp: 77–119.
- Burt RS. 2000. The network structure of social capital. *Research in Organizational Behavior* 22: 345–423. [https://doi.org/10.1016/S0191-3085\(00\)22009-1](https://doi.org/10.1016/S0191-3085(00)22009-1)
- Callejas-Juárez N, Ortega-Gutiérrez J, Domínguez-Viveros J, Rebollar-Rebollar S. 2015. La producción de becerros en Chihuahua: un análisis económico marginal. *Avances en Investigación Agropecuaria* 19 (2): 51–66.
- Callejas-Juárez N, Martínez-Castañeda FE, Rebollar-Rebollar S. 2020. Estructura de mercado para cerdos vivos en México. *Redes. Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales* 31 (2): 116–123. <https://doi.org/10.5565/rev/redes.888>
- Callejas-Juárez N, Rebollar-Rebollar S. 2021. Análisis de la demanda de bovinos carne en pie en los centros de sacrificio de México, 2000–2018. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 12 (3): 861–877. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i3.5569>
- Carmona-Martínez C, Martínez-Nevarez J, Diaz-Samaniego A, Skaggs R. 2007. Resultados de la encuesta aplicada a exportadores de ganado en Chihuahua, México. *NM State University Agricultural, Experiment Station Publications Bulletin* 794: 1–36.
- Cruz-Jiménez J, García-Sánchez RC. 2013. El mercado de la carne de bovino en México, 1970–2011. *Estudios Sociales. Revista de Investigación Científica* 22 (43): 87–110.
- The Growth Lab at Harvard University. 2019. Growth Projections and Complexity Rankings. *Harvard Dataverse V3: 6*. <https://doi.org/10.7910/dvn/xtaqmc>
- Freeman LC, Roeder D, Mulholland RR. 1979. Centrality in social networks: II experimental results. *Social Networks* 2 (2): 119–141. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(79\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0378-8733(79)90002-9)
- García-Valdecasas JI. 2011. Una definición estructural de capital social. *Redes. Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales* 20: 132–160.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2019. Encuesta nacional agropecuaria. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ciudad de México, México. <https://www.inegi.org.mx/temas/ganaderia> (Retrieved: December 2019).
- Jiménez-Jiménez RA, Rendón-Rendón MC, Chávez-Pérez LM, Soler-Fonseca DM. 2019. La polarización de los sistemas de producción pecuaria en México. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 4 (1): 31–38.
- Knoke D, Burt R. 1983. Prominence. In *Applied Network Analysis*. SAGE: Newbury Park, CA, USA, pp: 195–222.
- Macías-López M, Callejas-Juárez N, Ortega-Montes F. 2019. Capital social y desempeño en sistemas de producción pecuarios. *Agro Productividad* 12 (2). <https://doi.org/10.32854/agrop.v12i2.1356>
- Méndez-Cortés V, Mora-Flores JS, García-Salazar JA, Hernández-Mendo O, García-Mata R, García-Sánchez RC. 2019. Typology of cattle growers in the northern zone of the state of Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 22 (2): 305–314.

- Moreno-Medina S, Ibarra-Flores FA, Martín-Rivera MH, Retes-López R, Hernández-Hernández JE. 2021. El destete precoz de becerros y becerras castradas para exportación como una alternativa viable en la ganadería de Sonora. *Revista Mexicana de Agronegocios* 49: 89–99.
- Robinson SE, Christley RM. 2007. Exploring the role of auction markets in cattle movements within Great Britain. *Preventive Veterinary Medicine* 81 (1–3): 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2007.04.011>
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2020. Capacidad instalada para sacrificio de especies pecuarias. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. <https://www.gob.mx/siap/documentos/capacidad-de-sacrificio-de-especies-pecuarias> (Retrieved: June 2020).
- SDR (Secretaría de Desarrollo Rural). 2020. Movilización de ganado. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Chihuahua. Chihuahua, México. <http://www.chihuahua.gob.mx/sdr> (Retrieved: May 2020).
- SIAP (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera). 2020. Panorama agroalimentario 2020. Ciudad de México, México [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020) (Retrieved: September 2020).
- Wasserman S, Faust K. 1994. *Social network analysis: methods and applications*. Cambridge University Press: Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815478>
- Xiao Q. 2013. A method for measuring node importance in hypernetwork model. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5 (2): 568–573. <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.5.4991>
- Zhang J, Luo Y. 2017. Degree centrality, betweenness centrality, and closeness centrality in social network. *In proceedings of the 2017 2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2017)*. Atlantis Press: Bangkok, Thailand, pp: 300–303. <https://doi.org/10.2991/msam-17.2017.68>

## ESTRUCTURA DE LA RED PARA LA MOVILIDAD DE BOVINOS PRODUCIDOS EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, MÉXICO, 2010–2019

Nicolas Callejas-Juárez<sup>1</sup>, Graciela del Carmen Sandoval-Luján<sup>2</sup>,  
José María Salas- González<sup>2</sup>, Eduardo Domínguez-Arrieta<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Zootecnia y Ecología. Periférico Francisco R. Almada km 1, Chihuahua, Chihuahua, México. C. P. 31453.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Contaduría y Administración Extensión Delicias. Calle 6ª y Ave. 21 Poniente, Ciudad Delicias, Chihuahua, México, C. P. 33000.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Sociología Rural. Carretera Federal México-Textcoco km 38.5, Textcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Contaduría y Administración Extensión Delicias. Calle 6ª y Ave. 21 Poniente, Ciudad Delicias, Chihuahua, México. C. P. 33000.

\* Autor para correspondencia: eddoming@uach.mx

### RESUMEN

El análisis de redes sociales (ARS) es una herramienta que permite estudiar la estructura e importancia de los mercados pecuarios y de sus elementos. El objetivo de la investigación fue analizar la estructura de la red para la movilidad de bovinos producidos en el estado de Chihuahua, México, durante el periodo 2010–2019. Se utilizó la metodología de Análisis de Redes Sociales, considerando medidas de centralidad de los centros de origen y de los centros de destino. En el periodo 2010–2019, la estructura de la movilidad de ganado bovino estuvo determinada por 67 centros de origen (productores) y 32 centros de destino (consumidores). Los productores movilizaron 10 012 227 de cabezas con los propósitos de exportación de becerros para engorda (39.2 %), repasto (26.6 %), engorda (13.9 %), sacrificio (13.5 %) y subasta, pie de cría y eventos (6.7 %). La estructura de la movilidad de ganado bovino estuvo determinada por estos siete productos que conformaron tres mercados de destino: exportación, nacional y local. El principal centro de origen fue el municipio de Chihuahua, mientras que de destino fueron EUA y el municipio de Chihuahua, por lo que se constituyen como los principales elementos de la red y los nodos clave del dinamismo de la ganadería bovina en el estado. También fue posible corroborar que la exportación de becerro para engorda fue el principal propósito de la movilidad de ganado para el estado de Chihuahua.

**Palabras clave:** Trazabilidad de bovinos, exportación de becerros, becerro destetado.

### INTRODUCCIÓN

El análisis de redes sociales (ARS) es una herramienta que actualmente se está aplicando para el análisis de la estructura o desempeño e importancia de mercados, tanto para la oferta, demanda, control sanitario y planeación de la producción. A diferencia del estudio de mercadeo en donde se analizan los canales y márgenes de comercialización, el ARS, además, permite identificar y cuantificar la importancia de cada

**Citation:** Callejas-Juárez N, Sandoval-Luján G del C, Salas-González JM, Domínguez-Arrieta E. 2023. Estructura de la red para la movilidad de bovinos producidos en el estado de Chihuahua, México, 2010–2019.

*Agrociencia* 57(3): 622-653.  
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i3.2742>

**Editor in Chief:**  
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: April 13, 2022.  
Approved: February 15, 2023.  
**Published in *Agrociencia*:**  
April 13, 2023.

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



elemento en la red (Callejas-Juárez *et al.*, 2020; Callejas-Juárez y Rebollar-Rebollar, 2021). El mercado siempre será la mayor preocupación de un productor pecuario: bajo un sistema económico tradicional, el productor depende de que el mercado adquiera sus productos una vez producidos; mientras que, en el sistema de mercado actual, los productores venden antes de producirlo. Como resultado, se presenta una tendencia de polarización entre los sistemas de producción tecnificados y familiares (Jiménez-Jiménez *et al.*, 2019).

La importancia mundial de la actividad productora de bovinos puede observarse en el mercado mundial de la carne de res. En 2019 el valor de las exportaciones mundiales fue de \$25.4 mil millones USD, en donde Brasil aportó 23.1 %, EUA 13.0 % y Australia 14.9 %; en la demanda, China importó 24.5 %, Corea del Sur 7.2 % y Hong Kong 6.2 % (The Growth Lab at Harvard University, 2019). Es claro que la demanda se concentró en el continente asiático.

La importancia de la ganadería bovina en México radica en que está presente en todo el territorio nacional (Callejas-Juárez *et al.*, 2015) y constituye el principal uso del suelo agropecuario (SIAP, 2020). En 2020 produjo 35.3 % del volumen nacional de carne (7.9 puntos porcentuales por debajo del volumen producido de carne de ave), posee el 43.1 % del valor de la producción pecuaria y un inventario de poco más de 35 millones de cabezas de ganado. Se exportó poco más de 1.4 millones de cabezas de ganado (SIAP, 2020); se cuentan rastros para sacrificar un poco más de 1.1 millones de cabezas mensuales, con una capacidad utilizada de apenas 52.2 % (SADER, 2020). La estructura del hato ganadero bovino en México se integra por 45.3 % vacas, 26.3 % animales en desarrollo, 11.9 % vaquillas, 11.5 % reses en engorda, sementales 3.0 % y el resto no está clasificado (INEGI, 2019).

El estado de Chihuahua, México, es la entidad federativa con la mayor superficie nacional, equivalente al 12.0 % (INEGI, 2019); el sistema de producción vaca-cría se desarrolla en 17.5 millones de hectáreas de pastizales y matorrales (Baez-González *et al.*, 1999). En 2020, el estado de Chihuahua contó con un inventario de bovinos superior a 2.5 millones de cabezas de ganado, aportando 1.6 % del volumen nacional producido de carne, equivalente a 2.2 % del valor nacional pecuario (SIAP, 2020). Es también el principal estado exportador de becerro para engorda a EUA con 479 100 cabezas de ganado (SDR, 2020). En el entorno local, la actividad productiva bovinos representó 91.6 % del volumen estatal producido de carne en el estado y 94.4 % del valor de la producción (SIAP, 2020).

De acuerdo a Callejas-Juárez *et al.* (2015), el grado tecnológico del sistema de producción de bovinos carne en Chihuahua está determinado por variables de productividad como mortalidad del hato ( $4.0 \pm 1.5$  %), porcentaje de pariciones ( $68.8 \pm 6.3$  %), vacas de desecho ( $8.8 \pm 3.0$  %), toros de desecho ( $13.0 \pm 11.2$  %), producción de carne por hectárea ( $88.7 \pm 7.8$  kg ha<sup>-1</sup>), costo de producción ( $1742.4 \pm 947.6$  \$ MXN vaca<sup>-1</sup>), e ingreso ( $176.2 \pm 123.7$  \$ MXN ha<sup>-1</sup>,  $2613.0 \pm 1440.8$  \$ MXN becerro para engorda<sup>-1</sup> y  $16.0 \pm 8.5$  \$ MXN kg de becerros para engorda<sup>-1</sup>), lo que explica los importantes volúmenes de las exportaciones de ganado bovino a los EUA.

El método de análisis de redes sociales (ARS) tiene como objetivo medir la importancia de los nodos de centralidad y prestigio de la red (Knoke y Burt, 1983), mediante el análisis de las métricas de grado, cercanía, intermediación, vector propio, nominación acumulada, entre otros (Xiao, 2013). Individuos, organizaciones y empresas son nodos en la red; la centralidad se utiliza para medir el poder, la actividad y la conveniencia de comunicación de estos nodos (Zhang y Luo, 2017). En México, el uso del ARS en sistemas de producción pecuario apenas comienza. Callejas-Juárez *et al.* (2020) analizaron la estructura de la red de abasto de cerdos vivos en rastros de México, donde encontraron una baja densidad de la red; en otro estudio, Callejas-Juárez y Rebollar-Rebollar (2021) encontraron que la red de distribución de carne de bovino en pie mostró una baja centralización en México, asociada con la dependencia en la demanda de los centros de consumo (rastros) con la oferta local.

Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue analizar la estructura de la red para la movilidad de bovinos producidos en Chihuahua durante el periodo 2010–2019 con el propósito de generar información que explique la estructura de la producción de bovinos en Chihuahua. Así mismo, la hipótesis es que la cercanía del estado a EUA lo vuelve su principal mercado para la exportación de terneros, y que el municipio de Chihuahua es el elemento más central de la red.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con la población de bovinos (N) producidos en el estado de Chihuahua, México, para cada variable de estudio y durante el periodo 2010–2019. Las variables analizadas fueron el volumen total de bovinos movilizados por municipio ( $V_i$  = cabezas), oferta u origen de la producción ( $X_i$  = 67 municipios), demanda o destino de producción ( $Y_i$  = 29 entidades federativas de México) y uso o motivo ( $z_1$  = engorda,  $z_2$  = exportación,  $z_3$  = pie de cría,  $z_4$  = repasto,  $z_5$  = sacrificio,  $z_6$  = subasta y  $z_7$  = exposición/ evento/espectáculo). Los datos de la cantidad, origen y destino de bovinos se obtuvieron de la Secretaría de Desarrollo Rural del gobierno del estado de Chihuahua (SDR, 2020) y el volumen producido del Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP, 2020).

Para dar respuesta al objetivo fue necesario hacer tres tipos de análisis: estudiar la tendencia de las movilizaciones de ganado bovino mediante la tasa de crecimiento media anual (TCMA), analizar la red de movilización de ganado bovino mediante medidas de la red y la tendencia de las medidas de la red. Los valores promedio estimados se presentan con su respectiva desviación estándar ( $\bar{x} + SD$ ). La estructura y relación de la red se realizó utilizando la teoría del ARS propuesta por Wasserman y Faust (1994) y Borgatti y Halgin (2011) a través de medidas de densidad, de cohesión, centralidad y análisis gráficos. Las figuras de la red se obtuvieron con el software UCINET desarrollado por Borgatti *et al.* (2002).

El orden de la red analizada (m) contó con 67 municipios como centros de abasto del estado de Chihuahua y 29 entidades federativas más Estados Unidos de América (EUA) como centros de destino, en tanto que el tamaño (n) estuvo en un rango de 233

a 460 relaciones comerciales de 2144 posibles. La red de distribución de bovinos en pie  $A(I, J)$  se conformó por centros de salida ( $\alpha_i$ ), centros de entrada ( $\alpha_j$ ) e intercambios comerciales ( $\alpha_{ij}$ ) resultado de la intersección de  $\alpha_i$  con  $\alpha_j$ . Para un mejor manejo,  $A(I, J)$  se dicotomizó asignándole un 1 al vértice que tuvo un intercambio comercial ( $\alpha_{ij} - 1$ ) y 0 en caso contrario ( $\alpha_{ij} - 0$ ). Como el intercambio comercial se dio en un solo sentido (origen-destino), la red fue dirigida y la importancia de los vértices estuvo en función del número de relaciones comerciales y del volumen de cabezas de ganado movilizadas (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Nodos posibles y existentes de la red bovinos en el estado de Chihuahua durante 2010–2019.

Año	Intercambios existentes ( $D_{ij} \neq 0$ )	Centros de destino ( $\alpha_j$ )
2010	233	23
2011	354	28
2012	460	29
2013	420	28
2014	342	26
2015	238	25
2016	303	26
2017	302	29
2018	291	27
2019	286	27

Para analizar  $A(I, J)$  se utilizaron medidas de grado, cercanía e intermediación (Freeman *et al.*, 1979) y de centralidad de vector propio (Bonacich, 1987). La centralidad de grado de una red ( $G_{ij}$ ) es la suma de las relaciones comerciales existentes en la red, mientras que el grado promedio ( $\bar{G}_{ij}$ ) se obtiene como el cociente de  $G_{ij}$  entre el total de nodos posibles (N) (Ecuación 1). Este indicador se obtuvo tanto para cada elemento de la red como para la red total.

$$G_{ij} = \sum_j \alpha_{ij}; \bar{G}_{ij} = \frac{G_{ij}}{N} * 100 \quad (1)$$

El grado de salida ( $G_i$ ) es el número de relaciones comerciales de un centro de abasto, mientras que el grado de entrada ( $G_j$ ) es el número de relaciones comerciales que reciben los centros de destino (Ecuación 2).

$$G_i = \sum_{i=1}^{30} \alpha_{ij}; G_j = \sum_{j=1}^{67} \alpha_{ji} \quad (2)$$

La densidad porcentual ( $D$ ) midió el cociente del número de relaciones comerciales realizadas ( $m$ ) entre el número de relaciones comerciales posibles ( $n-1$ ) (Ecuación 3). Los dos resultados posibles son que  $D \leq 100\%$ .

$$D = \frac{m}{n - 1} * 100 \quad (3)$$

La intermediación de nodos ( $B$ ) es una medida de la red que indica el porcentaje de rutas de mercadeo que pasan por un nodo, por lo que representan el enlace entre dos nodos y son una de las principales fuentes de información de la red. Esta labor de intermediación es común en productores convencionales que carecen de capacidad para comercializar directamente debido a su escala de producción (Méndez-Cortés *et al.*, 2019). La intermediación se obtiene como el cociente de la suma de rutas más cortas que pasan por los vértices ( $V$ ) y la suma de caminos más cortos entre vértices ( $S$ ) (Ecuación 4).

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{v}{s} \quad (4)$$

La cercanía ( $R$ ) es una medida de posición o accesibilidad de un actor en la red e indica por cuántos actores debe pasar el producto para llegar a otro actor o a todos los actores de la red (Ecuación 5).

$$R = \frac{n - 1}{\sum_{i=1}^n d} \quad (5)$$

La centralidad del vector propio ( $E$ ) es una medida relativa que representa la posición o importancia de cada nodo y su relación con nodos bien relacionados en la red; es decir, mide la calidad o importancia de cada nodo (Ecuación 6).  $E_i$  es la proporción del valor propio de  $A$  multiplicado por la sumatoria de vectores adyacentes al centro de abasto, mientras que  $E_j$  está en relación al centro de consumo:

$$E_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \quad (6)$$

donde  $x_i / x_j$  denota la centralidad del nodo  $i/j$ ,  $\alpha_{ij}$  representa una entrada de la matriz de adyacencia ( $A$  ( $\alpha_{ij}$ ) = 1 si los nodos  $i$  y  $j$  están conectados por una arista y ( $\alpha_{ij}$ ) = 0 en caso contrario) y  $\lambda$  denota el mayor valor propio de  $A$ .

De acuerdo a Wasserman y Faust (1994) el capital social (CS) es una medida de cómo los elementos de la red se comunican (información) para beneficiar o perjudicar a los integrantes (Ecuación 7). El capital social es un recurso que se constituye como un complemento del capital humano (Burt, 2000). Una triada es la relación cerrada entre tres elementos de la red.

$$CS = \frac{3 * \sum_{i=1}^n \text{Triadas existentes}}{\sum_{i=1}^n \text{Triadas posibles}} \quad (7)$$

Finalmente, la homofilia (H) es una medida que indica la preferencia de los centros de abasto para movilizar ganado a los centros de consumo y viceversa (Ecuación 8). Se calcula como la diferencia de la suma del ganado movilizado fuera (GMO) y la suma del ganado movilizado dentro (GMI) entre el total de ganado movilizado ( $GMT = GMI + GMO$ ).

$$H = \frac{GMO - GMI}{GMT} \quad (8)$$

El sistema de movilidad de ganado bovino tendrá una mayor homofilia cuanto mayor sea la proporción de cabezas de ganado consumidas en los mercados nacional y local; sin embargo, será más deseable la movilización de ganado para el mercado de EUA debido a mejores precios de mercado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el periodo de análisis (2010–2019), fueron movilizadas 10 012 227 cabezas de ganado bovino en 67 centros de origen (municipios) del estado de Chihuahua, que tuvieron  $26.8 \pm 1.9$  mercados de destino agrupados en tres clases: internacional (39.2 %), local (32.7 %) y nacional (28.1 %). Sin embargo, el ganado bovino con destino de repasto posteriormente es enviado a exportación, por lo que alcanza 65.9 % del ganado movilizado.

Por tipo de ganado, 42.5 % correspondió a becerros para engorda, 19.6 % becerras, 15.5 % vacas, 10.4 % vaquillas, 6.9 % novillos, 2.5 % toros, 2.4 % toretes y 0.1 % terneras. Así mismo, fueron siete los motivos para la movilidad de ganado: exportación, repasto, engorda, sacrificio, subasta, pie de cría y exposición (39.2, 26.6, 13.9, 13.5, 5.6, 0.7 y 0.4 %, respectivamente). Los mercados y motivos han permitido un incremento del grado de integración con el mercado de EUA y mantenerse como la principal fuente de abastecimiento de terneros de destete y de repasto. Caso similar ocurre con la ganadería bovina del estado de Sonora, donde la producción de becerros y becerras para exportación se ha mantenido en los últimos diez años (Moreno-Medina *et al.*, 2021).

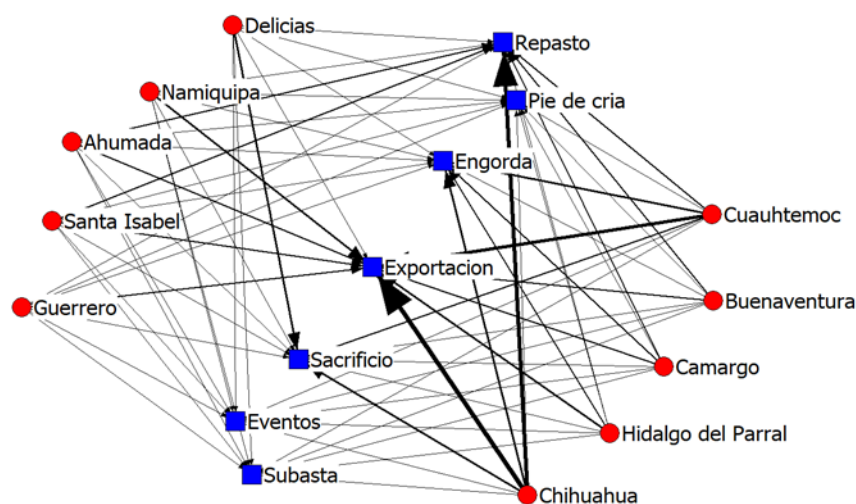
La dinámica de la red por motivo de movilización del ganado permitió identificar dos grupos destino: el primero, conformado por repasto, exportación, engorda y sacrificio; el segundo por eventos, subasta y pie de cría. La dinámica de movilización por tipo de ganado mostró que la movilidad del ganado fluctuó de manera diferenciada: la de los toretes se incrementó 6620.6 %, vaquillas 79.9 %, becerras 40.7 %, vacas 33.7 % y becerros para engorda 12.4 %; en tanto que la movilización de terneras, novillos y toros disminuyó 98.7, 94.6 y 6.5 % respectivamente. La dinámica de la red bovinos carne está sustentada en la producción de terneros de destete y de repasto con fines

de exportación a EUA, más que en la producción de carne para el abasto del mercado local. La producción de carne en el estado de Chihuahua se mide por el número de becerros producidos y se consideran la principal salida del sistema vaca-cría, mientras que la demanda de recursos se complementa con la estructura del hato como vacas, sementales y vaquillas.

En el periodo de análisis, de las 10 012 227 cabezas de ganado movilizado, 39.2 % fueron al mercado de EUA, 32.7 % al mercado local y 28.1 % al mercado nacional. Así mismo, los mercados nacional e internacional incrementaron su participación 21.1 y 7.6 %, respectivamente, mientras que el mercado local disminuyó 1.4 %. No obstante, el dinamismo para los mercados local, nacional e internacional no fue significativo ( $p = 0.182$ ) y para el principal mercado (internacional) los volúmenes anuales exportados fueron distintos ( $p = 0.425$ ). Esto sustenta la tesis de que el sistema de producción bovinos carne en Chihuahua es cada vez más dependiente del mercado de EUA, mientras que los becerros para engorda no exportados fueron movilizados a los mercados nacional y local. En el periodo 1970–2011 el precio del becerro de exportación se incrementó 42.5 %, mientras que el incremento en el mercado nacional fue apenas 18.4 %, hecho que desincentiva la producción de carne nacional (Cruz-Jiménez y García-Sánchez, 2013).

En este sentido, los mercados de destino fueron importantes para definir la estructura de la ganadería bovina del estado. El primer grupo estuvo conformado por las cabezas de ganado que salen del estado por motivo de exportación, repasto y sacrificio (9 337 744 cabezas de ganado, 93.3 %). Con fines de exportación, el  $94.0 \pm 2.3$  % de los centros de origen movilizaron 3 928 472 (39.2 %) cabezas de ganado, los cinco centros de origen más importantes aportaron el 39.8 %: Chihuahua  $24.9 \pm 3.3$  %, Cuauhtémoc  $11.5 \pm 1.5$  %, Hidalgo del Parral  $5.4 \pm 0.8$  %, Namiquipa  $4.8 \pm 0.8$  % y Santa Isabel  $4.5 \pm 1.9$  %. Con fines de repasto, 100 % de los centros de origen movilizaron 2 665 607 cabezas de ganado, los cinco municipios más importantes movilizaron el  $39.8 \pm 3.9$  %: Chihuahua  $24.9 \pm 3.3$  %, Madera  $4.3 \pm 2.0$  %, Santa Isabel  $3.7 \pm 0.08$  %, Guadalupe y Calvo  $3.6 \pm 0.8$  % y Balleza  $3.2 \pm 0.8$  %. Con fines de engorda,  $88.8 \pm 12.5$  % de los centros de origen movilizaron 1 390 722 cabezas de ganado, los cinco centros de origen más importantes movilizaron el 50.1 %: Chihuahua  $17.8 \pm 2.7$  %, Cuauhtémoc  $16.6 \pm 7.3$  %, Hidalgo del Parral  $6.3 \pm 2.6$  %, Camargo  $4.9 \pm 2.8$  % y Delicias  $4.4 \pm 2.8$  %. Finalmente, con fines de sacrificio,  $97.5 \pm 2.5$  % de los centros de origen movilizaron 1 352 943 cabezas de ganado y los cinco centros más importantes aportaron 56.5 % de las cabezas de ganado: Chihuahua  $17.9 \pm 5.1$  %, Delicias  $16.8 \pm 3.6$  %, Cuauhtémoc  $11.1 \pm 2.5$  %, Saucillo  $6.6 \pm 1.7$  % y Riva Palacio  $4.1 \pm 1.1$  % (Figura 1).

El segundo grupo de destino estuvo conformado por los motivos de subasta, reproducción y eventos dentro del estado de Chihuahua, representando tan solo 6.7 % del total movilizado en el periodo de análisis. Con fines de subasta,  $88.4 \pm 5.9$  % de los centros de origen movilizaron 564 120 cabezas de ganado y los cinco municipios más importantes movilizaron 34.4 %: Satevó  $7.3 \pm 1.9$  %, Chihuahua  $6.5 \pm 2.6$  %, Guerrero  $6.2 \pm 1.5$  %, Santa Isabel  $5.3 \pm 2.1$  %, Huejotitán  $4.5 \pm 1.4$  %. Con fines de pie de cría,



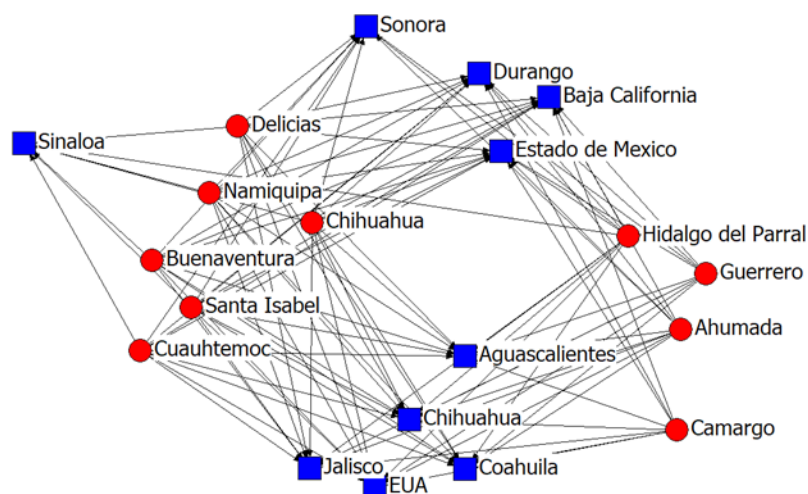
**Figura 1.** Red por motivo de movilización del ganado bovino en el estado de Chihuahua durante 2010–2019.

45.4 ± 10.4 % de los centros de origen movilizaron 70 328 cabezas de ganado, los cinco municipios más importantes movilizaron el 79.1 %: Juárez 25.6 ± 31.2 %, Chihuahua 24.8 ± 13.0 %, Delicias 15.7 ± 15.7 %, Santa Isabel 7.9 ± 10.4 % y Saucillo 5.1 ± 9.0 %. Con excepción de Chihuahua que movilizó ganado para producción de carne, los demás centros de origen movilizaron para la producción de leche. Finalmente, para fines de eventos, exposición o espectáculos, 54.8 ± 12.0 % de los centros de origen movilizaron 40 035 cabezas de ganado, los cinco centros de origen más importantes movilizaron el 46.9 %: Chihuahua 21.9 ± 5.7 %, Cuauhtémoc 14.6 ± 10.9 %, Santa Isabel 5.0 ± 4.2 %, Guerrero 2.9 ± 2.0 % y El Tule 2.4 ± 3.6 % (Figura 1). Esto implica que la actividad ganadera bovina en Chihuahua está orientada a los mercados fuera de la entidad y principalmente para la exportación de becerros. Una pobre situación de la vegetación y los bajos indicadores productivos de los ranchos ganaderos lo confirman (Baez-González *et al.*, 1999).

La oferta anual y tipo de ganado bovino son distintos en los municipios de Chihuahua. Por ello, el número de cabezas de ganado bovino movilizadas en promedio durante el periodo de análisis no fue estadísticamente diferente entre años ( $p = 0.997$ ), pero sí por tipo de ganado ( $p < 0.001$ ). El 100 % de los centros de origen comercializaron bovinos en pie todos los años; sin embargo, no todos los municipios comercializaron con todos los destinos en todos los años. En promedio, cada año los centros de origen movilizaron ganado bovino en un intervalo de 25.2 a 28.4 centros de destino. Esto significa que, quitando a EUA, el estado de Chihuahua comercializó ganado bovino con casi todos los estados de México, excepto cinco que debido a la cantidad enviada (menos de 10 cabezas de ganado en 10 años) se consideraron insignificantes (Baja California Sur, Guerrero, Campeche, Quintana Roo y la Ciudad de México).

### Origen-destino

Los destinos internacional y estatal determinaron la estructura o importancia de la ganadería en Chihuahua de acuerdo a la importancia del volumen y de la información de mercados. Los dos destinos más importantes para la movilización de ganado recibieron 87.7 % de los bovinos movilizados (Chihuahua 48.5 % y EUA 39.2 %), mientras que el tercero fue Baja California con 6.7 % del total; los otros 29 destinos concentraron solo 5.6 % de los bovinos movilizados. Por otra parte, la participación en el mercado del municipio de Chihuahua, como destino, se incrementó 8.7 % en el periodo de análisis, mientras que la de EUA disminuyó 8.4 %. Prácticamente, Chihuahua le ganó el mercado directo a EUA, al tener las funciones de centro de abasto e intermediario, siendo que el 100 % de los centros de origen utilizaron como intermediario al municipio de Chihuahua. Por su parte, los orígenes también disminuyeron sus envíos a Baja California al tener una mejor alternativa en el mercado de exportación (Figura 2).



**Figura 2.** Principales orígenes (rojo) y destinos (azul) del ganado bovino del estado de Chihuahua durante 2010–2019.

Es claro que la importancia de la ganadería bovina de Chihuahua muestra pertinencia en casi todos los mercados nacionales y uno internacional; sin embargo, en el caso del mercado nacional, 67.0 % de los terneros se envían a Baja California. Por ello, Chihuahua principalmente depende de dos mercados, EUA y Baja California. En este sentido, el mercado de la carne de bovino en México presenta una baja densidad media de las conexiones entre productores y centros de sacrificio, lo que indica una ineficiencia del mismo (Callejas-Juárez y Rebollar-Rebollar, 2021). La relación de Chihuahua con este último solo representó 1.0 % del total de cabezas de ganado bovino movilizadas en el periodo de análisis.

### Redes

El ARS, a través de sus indicadores, permite visualizar, medir y analizar la posición de la oferta municipal, la demanda internacional, estatal y local, así como los tipos de productos en la estructura de la red. La estructura de la red de movilización del ganado bovino producido en el estado de Chihuahua se caracterizó porque el 100 % de los municipios realizaron movilización de ganado durante el periodo de análisis. En promedio, la red ofertó a  $26.8 \pm 1.9$  de 29 centros de destino, iniciando con 23 en 2010 y llegando a un máximo de 29 en 2012 y 2017. Aun cuando todos los centros de abasto movilizan ganado, los dos principales fueron los municipios de Chihuahua y Cuauhtémoc. Mientras tanto, el municipio de Chihuahua y EUA fueron los dos centros de destino más importantes por su demanda.

Lo anterior se observa en las tres medidas más importantes de ARS para determinar la estructura de la red. En el periodo de análisis, la red realizó 812 relaciones de movilidad del ganado de 2144 posibles. Los centros de salida tuvieron un grado promedio de actividad de  $17.9 \pm 38.4$  %, cercanía de la red de  $51.7 \pm 1.7$  % y vector característico de  $12.7 \pm 0.7$  %. Por otro lado, los centros de entrada tuvieron un grado promedio de actividad igual al de los centros de salida, una cercanía de  $78.3 \pm 1.1$  % y vector característico de  $11.4 \pm 0.2$  %.

En el análisis de los 10 municipios más importantes por su oferta y las tres medidas de ARS se encontró que, para los centros de origen, el rango del grado de la red fue de 3.0 a 100 %: 25 % de los centros de abasto tuvo un grado de hasta 22.0 %, el 50.0 % de hasta 34.0 %, el 75.0 % de hasta 26.0 % y solamente Chihuahua tuvo un grado de 100 %. Una medida de poder de la red fue el grado de cercanía, que estuvo en un rango de 73.0 a 100 %: 25.0 % de los centros de origen tuvieron un grado de cercanía de hasta 77.0 %, el 50.0 % de hasta 80.0 %, el 75.0 % de hasta 85.0 % y solamente Chihuahua alcanzó un grado de 100 %. A su vez, el rango de la medida del vector característico fue de 1.0 a 21.0 %: para 25.0 % de los centros de origen tuvieron una medida del vector característico de hasta 8.0 %, el 50.0 % de hasta 11.0 % y 75.0 % de hasta 16.0 %. Otra medida de poder en la red es el grado de intermediación para mantenerla unida, que en promedio fue  $0.68 \pm 1.6$  %, el centro de origen con la medida más alta fue Chihuahua con 11.7 % y Juárez con 5.0 % (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Medidas de centralidad para los centros de origen del ganado bovino del estado de Chihuahua durante 2010–2019.

Centro de abasto	Grado	Cercanía	Valor característico	Intermediación
Chihuahua	1.00	1.00	0.21	0.12
Santa Isabel	0.78	0.92	0.18	0.03
Juárez	0.78	0.92	0.19	0.05
Camargo	0.75	0.91	0.17	0.02
Hidalgo del Parral	0.72	0.90	0.18	0.01
Buenaventura	0.72	0.90	0.18	0.01
Cuauhtémoc	0.66	0.88	0.18	0.03

Para los centros de destino, el rango de grado fue de 7.0 a 100 %: el 25.0 % de los centros de destino tuvieron un rango de hasta 13.5 %, el 50.0 % de hasta 33.5 %, el 75.0 % de hasta 55.0 % y solamente Chihuahua alcanzó 100 % de grado. Así mismo, el grado de cercanía tuvo un rango de 51.0 a 100 %: el 25.0 % de los centros de destino tuvo como máximo un grado de cercanía de 53.0 %, el 50.0 % de hasta 59.0 %, 75.0 % de hasta 68.0 % y solamente Chihuahua alcanzó un grado de cercanía de 100 %. Al igual que los centros de origen, el valor característico de los centros de destino fue bajo, con rango de 3.0 a 32.0 %: el 25.0 % de los centros de destino alcanzó una medida de vector característico de 6.25 %, el 50.0 % de hasta 15.0 % y 75.0 % de hasta 22.7 %. El grado de intermediación para los centros de destino fue  $2.8 \pm 8.8$  %, en este caso para Chihuahua fue de 44.4 %, EUA 24.3 % y Baja California 6.5 % (Cuadro 3).

**Table 3.** Measures of centrality for the destination centers of the bovine livestock in the state of Chihuahua during the 2010–2019 period.

Centro de destino	Grado	Cercanía	Valor característico	Intermediación
Chihuahua	1.00	1.00	0.32	0.18
USA	0.94	0.94	0.31	0.13
Baja California	0.82	0.84	0.30	0.07
Durango	0.81	0.83	0.30	0.06
Aguascalientes	0.67	0.75	0.26	0.04
Coahuila	0.63	0.72	0.25	0.04
Chiapas	0.58	0.70	0.23	0.04
Sonora	0.55	0.68	0.23	0.03
Querétaro	0.55	0.68	0.22	0.03
Mexico City	0.52	0.67	0.22	0.02

La medida del grado de los centros de destino revela la alta calidad del ganado movilizadopor los centros de origen, en tanto que las variables que lo explican fueron las razas de ganado, posicionamiento en el mercado (por la exportación de terneros al destete) y la situación sanitaria libre de tuberculosis. En un estudio, Carmona-Martínez *et al.* (2007) encontraron que 100 % de los productores encuestados compraron ganado de registro, lo que ha mejorado 93.7 % la calidad genética de su hato. La máxima centralidad del municipio de Chihuahua, como centro de origen (Cuadro 2) y de destino (Cuadro 3), explica su importancia dentro de toda la red de movilidad de ganado, lo posiciona como el más influyente en recepción y diseminador de información de mercado local, nacional e internacional.

Un indicador de ARS que fortalece los indicadores de centralidad y densidad en la estructura de la red es la homofilia. Identificar los elementos de la red con mayor homofilia también ayuda a comprender el porqué de la relación entre centros de origen (municipios) y centros de destino (mercados). La homofilia de exportación y dentro del país (mercado local más mercado nacional), fueron en promedio  $-33.0 \pm 41.4$  %; el 25.4 % de los centros de abasto presentó homofilia positiva (17.613.1 %) y 74.6 %

homofilia negativa ( $-50.2 \pm 32.6$  %); de esta última, cuatro centros de origen tuvieron homofilia completa ( $-100$  %). Por otro lado, la homofilia del mercado local y mercado nacional fue de  $15.8 \pm 44.5$  %; el 70.1 % de los centros de abasto tuvo homofilia positiva ( $39.8 \pm 22.8$  %) y 29.9 % homofilia negativa ( $40.6 \pm 29.4$  %). Una baja proporción de homofilia en centros de origen y destino estuvo relacionada con una alta calidad del ganado movilizado (becerros para exportación principalmente), mientras que, en el resto de ganado movilizado, excepto vacas lecheras, se observó en la baja proporción de ganado consumido en los centros de origen. Este indicador abona al objetivo e hipótesis de la investigación de que la ganadería bovina del estado de Chihuahua tiene afinidad por los mercados fuera de él.

Finalmente, la última medida que define la estructura de una red es el capital social (CS). El CS se define como el grado de asociación de conocimientos entre productores agropecuarios y permite un mejor aprovechamiento de los recursos humanos, monetarios y naturales de los sistemas de producción pecuarios (Macías-López *et al.*, 2019). El CS de la red fue de  $51.4 \pm 5.1$  %, pero muestra una tendencia a disminuir (6.8 %). Esto se debe a que el municipio de Chihuahua está incrementando su participación como intermediario en la exportación de becerros para engorda a los EUA a través de la Unión Ganadera Regional de Chihuahua (UGRCH). En el caso de la producción de terneros, ante una mayor dependencia de un solo comprador internacional (EUA = 39.2 %) y mayor dependencia de un mercado local (Chihuahua = 48.5 %), disminuye el flujo de información como condición para la toma de decisiones.

### Análisis

La estructura de la movilidad del ganado bovino producido en Chihuahua estuvo definida por los centros de origen, los siete motivos de la movilización del ganado, tres mercados y los centros de destino. Los centros de movilidad (origen y destino) mostraron una baja variación ( $32.5 \pm 18.0$ ), es decir, los centros tuvieron una actividad semejante porque existe una alta dependencia o lealtad comercial entre ellos.

Un hecho importante que cambió la tendencia de la movilización del ganado fue la helada que se presentó en 2011 (con temperatura de hasta  $-20$  °C), que trajo consigo una serie de externalidades negativas en el inventario y movilidad del ganado bovino, principalmente en bovinos carne. La helada de 2011 afectó 15 municipios de Chihuahua, y junto con la sequía de 2011–2012, causaron afectaciones en más de siete millones de hectáreas de cultivos y pérdidas por más de 4 mil millones \$ MXN (Brito-Castillo y Pedrozo-Acuña, 2015). En el periodo 2010–2012, el volumen de ganado movilizado se incrementó 42.3 %; pero disminuyó a 39.4 % de 2012–2014, es decir, prácticamente eliminó el crecimiento del periodo anterior.

En 2019, la movilidad del ganado bovino mostró recuperación y estuvo a solo 1.4 puntos porcentuales por abajo del registrado en 2012. No obstante, el motivo de la movilización menos afectado fue la exportación de becerros para engorda, que desde 2010 hasta 2013 presentó una TCMA negativa de 24.3 % y posteriormente una TCMA positiva de 53.9 %. No obstante, los motivos de la movilización con TCMA negativas fueron para engorda (72.1 %), sacrificio (53.8 %), repasto (43.0 %), subasta (28.0 %) y

exportación (7.5 %); mientras que la exposición y pie de cría se incrementaron (35.0 y 107.7 %, respectivamente). A partir de 2014, todos los motivos de movilización tuvieron TCMA positivas excepto la exposición (1.1 %): pie de cría 251.6 %, engorda 249.7 %, subasta 46.0 %, exportación 40 %, sacrificio 16.5 % y repasto 3.5 %.

La estructura de la red estuvo determinada por el 100 % de los municipios del estado de Chihuahua, pero el municipio de Chihuahua representó el elemento central que controla la información local, nacional e internacional. Mientras que prácticamente la producción de bovinos del estado de Chihuahua tuvo relación comercial con todos los demás estados del país, pero tuvo dos elementos centrales, Chihuahua y EUA que determinaron la estructura de los centros de destino. Sin embargo, toda la red está determinada por al menos 50.0 % de las movilizaciones de ganado por el municipio de Chihuahua, en caso de quitarla de la red provocaría que todos los centros de origen pierdan comunicación; así mismo, la fuerte dependencia del mercado de exportación (39.7 %) mejoró la productividad.

En el periodo de análisis, cuatro municipios concentraron 36.2 % del ganado bovino movilizado en el estado. Sin embargo, de cada 100 cabezas movilizadas, casi 20 (19.6 %) pasaron por el municipio de Chihuahua (capital del estado). Para los dos principales centros de origen, una variable que explicó la importancia de la capital del estado es la Unión Ganadera Regional que realiza subastas semanales, mientras que para Cuauhtémoc fue su posición geográfica de acceso a la Sierra de Chihuahua y su papel como centro de acopio. De esta manera, la movilidad del ganado bovino en Chihuahua tiene como principal destino dos centros de consumo que son la capital del estado y el mercado de exportación a Estados Unidos, que en conjunto demandaron 88.2 % de los bovinos movilizadas. El tercer destino importante fue Baja California, que en promedio demandó 6.4 % de los bovinos movilizadas. Además, cuando el mercado de exportación de becerros para engorda se contrae, este destino los absorbe, como ocurrió en los años 2012 y 2016 (Cuadro 4). A diferencia de Chihuahua que mostró

**Cuadro 4.** Origen y destino de la movilización de ganado bovino del estado de Chihuahua (en porcentaje).

Año	Origen				Destino			
	O1	O2	O3	O4	D1	D2	D3	D4
2010	20.1	8.3	3.3	3.6	46.7	46.1	4.9	2.4
2011	23.9	9.1	4.7	2.6	47.6	34.8	11.1	6.6
2012	20.9	9.3	4.6	3.7	44.5	29.1	14.7	11.7
2013	19.3	9.6	4.4	3.9	48.1	33.4	10.5	7.9
2014	19.5	8.5	4.3	4.3	46.0	44.4	4.7	4.9
2015	18.8	8.2	4.6	3.3	50.5	42.7	3.5	3.3
2016	19.0	7.8	3.5	3.5	51.6	38.9	5.0	4.5
2017	18.1	9.5	3.6	3.7	50.0	42.2	3.6	4.1
2018	18.6	9.5	3.3	4.3	49.5	42.9	3.1	4.5
2019	18.0	9.3	3.5	4.2	50.7	42.2	3.2	3.9

O1: Chihuahua; O2: Cuauhtémoc; O3: Hidalgo del Parral; O4: Namiquipa;  
 D1: Chihuahua; D2: EUA; D3: Baja California; D4: otros.

movimientos de ganado a grandes distancias (Chiapas 2248 km y Jiménez-Ciudad Juárez 584 km), Robinson y Christley (2007) encontraron que en Inglaterra los movimientos de ganado fueron mayormente en distancias cortas o mercados locales, lo que puede deberse a la estructura de mercado.

Solo el 3.1 % de los centros de origen (oferta) tuvieron una probabilidad mayor de 75.0 % de relacionarse con todos los centros de destino (demanda), 15.6 % menos de 25.0 % y 81.3 % entre 25.0 a 75.0 %. Así mismo, 96.9 % tuvieron una probabilidad de 25.0 a 75.0 % de relacionarse con todos los centros de origen, 3.1 % menos de 25.0 % y ninguno mayor de 75.0 %. Por ello la densidad de la red se considera baja, al haber tenido una eficiencia de 40.0 %, lo que se vio reflejado en un bajo grado de centralidad y de la medida del vector característico; no así en la medida de cercanía, que fue relativamente alta para los centros de salida, y media para los centros de entrada. La variable más importante que explicó esta densidad fue la alta centralidad del municipio de Chihuahua como centro de destino al tener relaciones comerciales con los 67 centros de origen, con los 32 estados de México y el mercado de EUA.

El alto grado de centralidad del municipio de Chihuahua (centro de origen) implica que tiene una mayor relación con la movilidad del ganado bovino, tanto como centro de abasto como centro de destino, y al tener el mayor grado de cercanía e intermediación se vuelve el canal de información idóneo para transmitir información al resto de los municipios, incluso mayor al del mercado de exportación. Variables como la Unión Ganadera, su posición como capital del estado de Chihuahua, centro de vías de comunicación, la oferta de subastas, así como el centro de acopio más importante del estado lo hacen el canal idóneo para el establecimiento y disseminación de políticas públicas. El segundo centro de abasto más importante fue Cuauhtémoc y su importancia está en ser la principal entrada o salida de la sierra de Chihuahua y tener el segundo centro de acopio más importante del estado. Finalmente, Chihuahua fue el principal centro de origen para movilizar bovinos con fines de exportación, repasto, engorda y sacrificio; mientras que Satevó lo fue para eventos subasta. Sin embargo, un problema de la centralidad es que potencia la comunicación epidemiológica (Brieger y Kendall, 1996). La homofilia indica una dependencia media de los centros de abasto de los mercados local y nacional, es decir, los centros de abasto tienen preferencia por el mercado nacional; en tanto que la homofilia del mercado local es baja y está asociada a que los centros de abasto encuentran mejores alternativas en los mercados nacional y de exportación que en el mercado local. La importancia del municipio de Chihuahua como centro de destino para el 100 % de los centros de origen ha permitido la formación de capital social, que se encuentra en prácticamente 50.0 % y está soportado por la información continua que recibe la red del mercado de los 67 centros de origen e internacional a través de la exportación de becerros para engorda. Dos aspectos del capital social son la información y la reciprocidad (García-Valdecasas, 2011) los cuales pueden verse, por el volumen movilizado, en tres elementos de la red (EUA-Municipio de Chihuahua-Baja California) de bovinos de Chihuahua.

Con estos resultados, se destaca la importancia de analizar la estructura de la red de distribución de bovinos en pie, que permitió no solo identificar los principales centros de origen, los principales centros de destino, la relación entre centros de origen y destino, sino también la transferencia de la información que se genera en la red y que permite a los elementos de la red tomar decisiones.

### CONCLUSIONES

La metodología del análisis de redes permite identificar y analizar la estructura de la ganadería de bovinos en el estado de Chihuahua. La estructura de la movilidad de ganado bovino de Chihuahua está determinada por cuatro productos y tres mercados. Así mismo, EUA y el municipio de Chihuahua representan los principales elementos en la estructura de la red y son la clave del dinamismo de la ganadería bovina en el estado de Chihuahua. Finalmente, hablar de la ganadería bovina del estado de Chihuahua es referirse a la producción de becerro para engorda y movilizados fuera de la entidad.

### REFERENCIAS

- Baez-González AD, Reyes-López G, Melgoza-Castillo A, Royo-Márquez M, Carrillo-Romo R. 1999. Características productivas del sistema vaca-cría en el estado de Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 37 (2): 11–24.
- Bonacich P. 1987. Power and centrality: a family of measures. *American Journal of Sociology* 92 (5): 1170–1182. <https://doi.org/10.1086/228631>
- Borgatti SP, Everett MG, Freeman LC. 2002. UCINET for Windows: Software for social network analysis. Analytic Technologies. Harvard, MA, USA. <https://sites.google.com/site/ucinet-software/home>
- Borgatti SP, Halgin DS. 2011. On network theory. *Organization Science* 22 (5): 1168–1181. <https://doi.org/10.1287/orsc.1100.0641>
- Brieger WR, Kendall C. 1996. The Yoruba farm market as a communication channel in guinea worm disease surveillance. *Social Science and Medicine* 42 (2): 233–243. [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(95\)00098-4](https://doi.org/10.1016/0277-9536(95)00098-4)
- Brito-Castillo L, Pedrozo-Acuña A. 2015. Inundaciones, heladas e incendios forestales. In Cavazos T. (ed.), *Conviviendo con la Naturaleza: El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México*. Ediciones ILCSA: Tijuana, México, pp: 77–119.
- Burt RS. 2000. The network structure of social capital. *Research in Organizational Behavior* 22: 345–423. [https://doi.org/10.1016/S0191-3085\(00\)22009-1](https://doi.org/10.1016/S0191-3085(00)22009-1)
- Callejas-Juárez N, Ortega-Gutiérrez J, Domínguez-Viveros J, Rebollar-Rebollar S. 2015. La producción de becerros en Chihuahua: un análisis económico marginal. *Avances en Investigación Agropecuaria* 19 (2): 51–66.
- Callejas-Juárez N, Martínez-Castañeda FE, Rebollar-Rebollar S. 2020. Estructura de mercado para cerdos vivos en México. *Redes. Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales* 31 (2): 116–123. <https://doi.org/10.5565/rev/redes.888>
- Callejas-Juárez N, Rebollar-Rebollar S. 2021. Análisis de la demanda de bovinos carne en pie en los centros de sacrificio de México, 2000–2018. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 12 (3): 861–877. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i3.5569>
- Carmona-Martínez C, Martínez-Nevarez J, Díaz-Samaniego A, Skaggs R. 2007. Resultados de la encuesta aplicada a exportadores de ganado en Chihuahua, México. *NM State University Agricultural, Experiment Station Publications Bulletin* 794: 1–36.
- Cruz-Jiménez J, García-Sánchez RC. 2013. El mercado de la carne de bovino en México, 1970–2011. *Estudios Sociales. Revista de Investigación Científica* 22 (43): 87–110.

- The Growth Lab at Harvard University. 2019. Growth Projections and Complexity Rankings. Harvard Dataverse V3: 6. <https://doi.org/10.7910/dvn/xtaqmc>
- Freeman LC, Roeder D, Mulholland RR. 1979. Centrality in social networks: II experimental results. *Social Networks* 2 (2): 119–141. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(79\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0378-8733(79)90002-9)
- García-Valdecasas JI. 2011. Una definición estructural de capital social. *Redes. Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales* 20: 132–160.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2019. Encuesta nacional agropecuaria. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ciudad de México, México. <https://www.inegi.org.mx/temas/ganaderia> (Recuperado: diciembre 2019).
- Jiménez-Jiménez RA, Rendón-Rendón MC, Chávez-Pérez LM, Soler-Fonseca DM. 2019. La polarización de los sistemas de producción pecuaria en México. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 4 (1): 31–38.
- Knoke D, Burt R. 1983. Prominence. *In Applied Network Analysis*. SAGE: Newbury Park, CA, USA, pp: 195–222.
- Macías-López M, Callejas-Juárez N, Ortega-Montes F. 2019. Capital social y desempeño en sistemas de producción pecuarios. *Agro Productividad* 12 (2). <https://doi.org/10.32854/agrop.v12i2.1356>
- Méndez-Cortés V, Mora-Flores JS, García-Salazar JA, Hernández-Mendo O, García-Mata R, García-Sánchez RC. 2019. Typology of cattle growers in the northern zone of the state of Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 22 (2): 305–314.
- Moreno-Medina S, Ibarra-Flores FA, Martín-Rivera MH, Retes-López R, Hernández-Hernández JE. 2021. El destete precoz de becerros y becerras castradas para exportación como una alternativa viable en la ganadería de Sonora. *Revista Mexicana de Agronegocios* 49: 89–99.
- Robinson SE, Christley RM. 2007. Exploring the role of auction markets in cattle movements within Great Britain. *Preventive Veterinary Medicine* 81 (1–3): 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2007.04.011>
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2020. Capacidad instalada para sacrificio de especies pecuarias. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. <https://www.gob.mx/siap/documentos/capacidad-de-sacrificio-de-especies-pecuarias> (Recuperado: junio 2020).
- SDR (Secretaría de Desarrollo Rural). 2020. Movilización de ganado. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Chihuahua. Chihuahua, México. <http://www.chihuahua.gob.mx/sdr> (Recuperado: mayo 2020).
- SIAP (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera). 2020. Panorama agroalimentario 2020. Ciudad de México, México [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020) (Recuperado: septiembre 2020).
- Wasserman S, Faust K. 1994. *Social network analysis: methods and applications*. Cambridge University Press: Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815478>
- Xiao Q. 2013. A method for measuring node importance in hypernetwork model. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5 (2): 568–573. <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.5.4991>
- Zhang J, Luo Y. 2017. Degree centrality, betweenness centrality, and closeness centrality in social network. *In proceedings of the 2017 2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2017)*. Atlantis Press: Bangkok, Thailand, pp: 300–303. <https://doi.org/10.2991/msam-17.2017.68>

