

Agrociencia

VOLUMEN 56, NÚMERO 7 | 1 DE OCTUBRE - 15 DE NOVIEMBRE, 2022 | MÉXICO



AGRICULTURA
SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

DIRECTORIO

DIRECTOR DE LA REVISTA AGROCIENCIA
Fernando Carlos Gómez Merino

**SUBDIRECTORA DE LA
REVISTA AGROCIENCIA**
Ana Rita Román Jiménez

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL
Roger Austin (**Inglaterra**)
José Sarukhán Kermez (**México**)
Barry C. Arnold (**EUA**)

COMITÉ ASESOR EDITORIAL INTERNO
Jorge Alvarado López
Jorge D. Etchevers Barra
Víctor A. González Hernández
Leopoldo E. Mendoza Onofre
Saíd Infante Gil
José A. Villaseñor Alva

RESPONSABLES DE LA EDICIÓN
Fernando Carlos Gómez Merino
Ana Rita Román Jiménez

FORMACIÓN, DISEÑO Y MAQUETACIÓN
L. Brenda Espejel Lagunas

TRADUCTORES
Inés Enríquez
Katharine McDevitt
Joel Castillo González
Nicolas Crossa

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 56, Número 7, 1 de octubre - 15 de noviembre, 2022**, Agrociencia es una publicación sesquimensual editada por el Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP 56230. Tel. 5959284427. www.colpos.mx. Editor responsable: **Dr. Fernando Gómez Merino**. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2021-031913431800-203. ISSN: 1405-3195. eISSN: 2521-9766, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dr. Saíd Infante Gil. Fecha de última modificación, **9 de diciembre del 2022**.

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

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

~~~~~  
Oficinas Centrales:

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

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: Daños externos causados por la alimentación del adulto de *Metamasius spinolae*.

Página: 1357 y 1366

Fotografía original: Dr. Andrés Quezada Salinas



AGRICULTURA

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

ANIMAL SCIENCE * CIENCIA PECUARIA

AGRONOMIC POTENTIAL OF BIOFERTILIZERS ON GROWTH, YIELDS
AND NUTRITIONAL QUALITY OF A VETCH-OAT-TRITICALE INTER-
CROPPING SYSTEM

1224

*

POTENCIAL AGRONÓMICO DE LOS BIOFERTILIZANTES SOBRE EL CRE-
CIMIENTO, EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD NUTRICIONAL DE UN
SISTEMA DE CULTIVO INTERCALADO DE VEZA, AVENA Y TRITICALE

Sana Dhane **Fitouri**, Khaoula **Boudabbous**, Ali **Ben Romdhane**,
Soumaya Tounsi **Hammami**, Wajdi **Dhib**, Faycel **Ben Jeddi**,
Chahine **Karmous**, Salah **Ben Youssef**

CROP SCIENCE * FITOCIENCIA

EVALUATION OF QUINOA GERMPLASM IN ENVIRONMENTS OF THE
CENTRAL HIGH-VALLEY LANDS OF MEXICO

1254

*

EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA DE QUINUA EN AMBIENTES DEL
ALTIPLANO CENTRAL DE MÉXICO

Miriam Gabriela **Valverde-Ramos**, Eduardo **Espitia-Rangel**,
Salvador **Miranda-Colín**, Ignacio **Benítez-Riquelme**

INTERVARIETAL CROSSES, AN ALTERNATIVE FOR INCREASING
YELLOW MAIZE (*Zea mays* L.) PRODUCTION IN VARIABLE
ENVIRONMENTS

1278

*

CRUZAS INTERVARIETALES, ALTERNATIVA PARA AUMENTAR LA
PRODUCCIÓN DE MAÍZ (*Zea mays* L.) AMARILLO EN
AMBIENTES VARIABLES

Roberto de la Cruz **Díaz-Juárez**, Amalio **Santacruz-Varela**,
Fernando **Castillo-González**, Noel Orlando **Gómez-Montiel**,
J. Jesús **García-Zavala**, Abel **Muñoz-Orozco**[†]

GENETIC PARAMETERS AND SELECTION CRITERIA IN QUINOA

1303

*

PARÁMETROS GENÉTICOS Y CRITERIOS DE SELECCIÓN EN QUINUA

Miriam Gabriela **Valverde-Ramos**, Ignacio **Benítez-Riquelme**,
Salvador **Miranda-Colín**, Eduardo **Espitia-Rangel**

POTENTIAL USE OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SQUASH SEEDS
(*Cucurbita moschata*), PEA PODS (*Pisum sativum*) AND GREEN BEAN
(*Phaseolus vulgaris*) IN AGROINDUSTRY 4.0

*

1328

USO POTENCIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE SEMILLAS DE
CALABAZA (*Cucurbita moschata*), VAINAS DE CHÍCHARO (*Pisum sativum*)
Y EJOTE (*Phaseolus vulgaris*) EN LA AGROINDUSTRIA 4.0

Selena del Rocío Martínez-Betancourt, Erich Dietmar Rössel-Kipping, Laura
Araceli López-Martínez, Hipólito Ortiz-Laurel, Gerardo Loera-Alvarado,
Alejandro Amante-Orozco, Víctor Manuel Ruiz-Vera

Peniocereus serpentinus AND *Austrocylindropuntia subulata*, NEW HOSTS OF
THE CACTUS WEEVIL (*Metamasius spinolae* Gyllenhal)
IN THE STATE OF MEXICO

*

1354

Peniocereus serpentinus Y *Austrocylindropuntia subulata*, NUEVOS
HOSPEDANTES DEL PICUDO DEL NOPAL (*Metamasius spinolae* Gyllenhal)
EN EL ESTADO DE MÉXICO

Jesús Ricardo Sánchez-Pale, Andrés Quezada-Salinas, Magnolia Moreno-
Velázquez, María Margarita Oliva-Hurtado

WATER USE AND SUPPLY IN THE NORTHERN REGION OF BAJA
CALIFORNIA, MEXICO

*

1372

CONSUMO Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA REGIÓN
NORTE DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Fidel Bautista-Mayorga, José Alberto García-Salazar, José Saturnino Mora-Flores,
Silvia Xochilt Almeraya-Quintero, Mercedes Borja-Bravo

SALINITY OF SOIL AND IRRIGATION WATER ON RICE PRODUCTIVITY
IN THE CANTON OF SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR

*

1404

SALINIDAD DEL SUELO Y AGUA DE RIEGO SOBRE PRODUCTIVIDAD
DEL ARROZ EN EL CANTÓN DE SAN JACINTO
DE YAGUACHI, ECUADOR

Reina Concepción Medina-Litardo, Sady Javier García-Bendezú,
Manuel Danilo Carrillo-Zenteno, Iris Perez-Almeida, Edwin Hasang-Moran

AGRONOMIC POTENTIAL OF BIOFERTILIZERS ON GROWTH, YIELDS AND NUTRITIONAL QUALITY OF A VETCH-OAT-TRITICALE INTERCROPPING SYSTEM

Sana Dhane **Fitouri**^{1,2*}, Khaoula **Boudabbous**¹, Ali **Ben Romdhane**², Soumaya Tounsi **Hammami**¹,
Wajdi **Dhib**², Faycel **Ben Jeddi**¹, Chahine **Karmous**³, Salah **Ben Youssef**⁴

¹ University of Carthage. National Agronomic Institute of Tunisia. Horticultural Sciences Laboratory, LR13AGR01, Tunisia.

² University of Carthage. Higher School of Agriculture of Mateur. Research Unit on Biodiversity and Resource Development in Mountainous Areas. Tabarka road, 7033 Mateur, Bizerte, Tunisia.

³ University of Carthage. National Agronomic Institute of Tunisia. Genetics and Cereal Breeding Laboratory, LR14AGR01, Tunisia.

⁴ University Tunis Carthage. National Institute of Agronomic Research of Tunisia (INRAT). Tunis, Tunisia.

* Author for correspondence: sanadhane2@gmail.com

ABSTRACT

The existing issues of climate change and population growth have driven to a rising awareness of the need to innovate in sustainable agricultural practices, such as intercropping. Enhancing the efficiency of intercropping systems by applying beneficial microorganisms (rhizobacteria, mycorrhizae or both) is a valuable approach. Two experiments were conducted to assess the effect of inoculation with beneficial microorganisms: rhizobacteria (B), mycorrhizae (M), and a rhizobacteria-mycorrhizae consortium (B+M) compared to a control of uninoculated plants (C) on a vetch-oat-triticale intercropping system. Growth, physiological traits, forage yield and qualities were determined at two harvesting periods (74 and 142 days after seeding, das). Overall, the different studied intercrops varied in terms of inoculation effects. Mycorrhizal inoculation had a significant positive effect on SPAD, total nitrogen and leaf to stem ratio for vetch, oat and triticale, respectively. Bacteria inoculation promoted leaf area and plant height for vetch and oat crops, but only plant height for triticale. The dual bacteria and mycorrhizae inoculum significantly improved the yield dry matter (YDM) by 41.2 % ensuring an increase of 2.1 and 1.67 Mg ha⁻¹ at 74 and 142 das respectively, compared to the control. Further data analysis revealed an improvement of calcium (Ca) and phosphorus (P) status after mycorrhizae inoculation. This study highlighted the potential applications of the dual biofertilizers on vetch-oat-triticale intercropping as a way to increase forage yield and qualities in semi-arid regions.

Keywords: rhizobacteria, mycorrhizae, forage yield, forage quality.

INTRODUCTION

Growing two or more species simultaneously in the same area is known as intercropping (Stomph *et al.*, 2020). This farming method boosts production,

Citation: Fitouri SD, Boudabbous K, Ben Romdhane A, Hammami ST, Dhib W, Ben-Jeddi F, Karmous C, Ben-Youssef S. 2022. Agronomic potential of biofertilizers on growth, yields and nutritional quality of a vetch-oat-triticale intercropping system. *Agrociencia*. 56(7): 1224-1253. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2776>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: July 28, 2022.
Approved: October 30, 2022.
Published in Agrociencia:
December 07, 2022.

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



biodiversity, and agroecosystem stability while effectively utilizing the land, nutrients, and water resources (Kamalongo *et al.*, 2020). Intercropping is based on eco-functional intensification and may enhance crop productivity, increasing the land utilization ratio (Agegnehu, 2008; Qin *et al.*, 2013) while emitting significantly lower amounts of greenhouse gases compared to individual crops. In arid and semiarid environments, mixtures of certain annual legumes with winter cereals are extensively used in forage production (Papastylianou, 2004). In such regions, legume and cereal mixtures have shown great potential for increasing forage yield and soil conservation (Anil *et al.*, 1998). Thus, extended studies on intercropping systems, particularly for cereals and legumes, become essential to promote and increase the quality of fodder suitable for silage and to adapt crop management to climate change (Iannucci *et al.*, 2006).

Systems using legumes as main crop and cereals as intercrops provide significant advantages, including higher total yield and more efficient land use (Jayanta *et al.*, 2018). This system enhances fodder yield relative to dry weight due to the grasses (Hashemi *et al.*, 2013), and improves feed quality due to the higher crude protein (CP) concentration of legumes. Furthermore, increased fodder yields imply heavy fertilizer and pesticide use, which increases the risk of soil and water pollution (Dar *et al.*, 2020). Besides, it also debilitates the plant roots, rendering them defenceless against certain pathogenic organisms. Therefore, advancement for biofertilizers in agricultural systems is required direly due to consumer demand for safe, residue-free food. In this case, the use of microbial inoculants is one of the potential tools of achieve this goal (Pertot *et al.*, 2016). Some species of the genera *Sinorhizobium*, *Allorhizobium*, and *Bradyrhizobium* constitute a significant group of beneficial organisms in agriculture. By forming nodules in the roots of host legume species, they can increase nitrogen fixation efficiency of up to 450 kg ha⁻¹ (Graham and Vance, 2003; Thomas and Singh, 2019).

Among these beneficial microbes, plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) are known to improve nutrient uptake and utilization in plants. PGPR are a group of rhizosphere bacteria that can colonize plant roots and provide beneficial effects on the host plant when available in large populations. The genera *Rhizobia*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Pseudomonas* and *Burkholderia* are among the most researched PGPR. They have been found to have many beneficial effects on plants (Saharan, 2011) and activate direct and indirect mechanisms for the benefit of the host plants (Glick, 2012). It has been reported that PGPB can improve soil nutrient availability, plant nutrition and growth, as well as the yields of a large diversity of crops around the world, including cereals (Youseif, 2018), legumes (Ferchichi *et al.*, 2019), vegetables and spices (Kang *et al.*, 2021). Furthermore, they have the ability to increase plant resilience against abiotic stress factors, such as alkalinity, salinity, drought and toxic metals (Abdelkrim *et al.*, 2018). *Rhizobia* also contribute to secrete plant hormones which are necessary for plant growth (Rosenblueth *et al.*, 2018), and may protect plants from phytopathogenic microorganisms (Compant *et al.*, 2005).

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) as a source of biofertilizers to improve plant mineral nutrition may significantly minimize fertilizer input while maintaining

adequate agricultural yields (Mohammad *et al.*, 2004). AMF also improve plant uptake of other macronutrients such as nitrogen (N), potassium (K), and magnesium (Mg) (Labidi *et al.*, 2012).

In order to answer two main questions, a research was conducted on vetch, oat, and triticale cultivated in a mixture in the presence or absence of mycorrhizae, bacteria, and a mixed consortium for two cuttings. Questions arisen are Does the presence of these inoculum have a different impact on agriculture's morphological and physiological traits, as well as nutrient uptake, in the three species grown in mixture? and What role do these inoculums play in increasing yield and fodder quality?

MATERIALS AND METHODS

Plant material, treatments, and research site

The plant material used in this study consisted of two forage cereals: black oat (*Avena strigosa*) cv. Saia. and triticale (x *Triticosecale*) cv. Our., and one forage legume species, hairy vetch (*Vicia villosa*) cv. Sejnane. These three mixture components were chosen on the basis of a previous study in which intercropping advantage was evidenced using LER (Land Equivalent Ratio) (Beya, 2018).

Four different inoculation treatments were assigned to the mixture; 1) mycorrhizal inoculum M: commercial product from France (Symbivit); 2) bacterial inoculum B: a consortium of three strains (patent pending) isolated from white lupin nodules (*Lupinus albus*). These three strains belong to the species *Agrobacterium radiobacter*, are non-antagonistic and have PGPR effects (Hammami *et al.*, 2019); 3) combined mycorrhizae and bacteria inoculum (M+B); and 4) the control treatment (C), without inoculation plus a reduced rate of 50 kg ha⁻¹ of diammonium phosphate (DAP).

The experiment was conducted in the 2018–2019 growing seasons in the experimental station of the Higher School of Agriculture of Mateur, located in Northwest of Tunisia (37° 03' N, 9° 36' E). This region has a semi-arid climate with annual precipitations of 560 mm and average annual air temperatures of 17.07 °C; weather conditions during the experimental season are shown (Table 1). The soil type of the experimental site, classified as a vertisol, had a clay-silty texture. Physical and chemical properties, of soil at 0–40 cm depth, are shown (Table 2).

Experimental procedure

The experimental procedure was divided into two essays, the first was conducted in the field and the second in pots.

Field experiment implementation

The field experiment was carried out under rainfall conditions. A one-way factorial experiment (four treatments, four replicates per treatment) was distributed using a completely random design across 16 experimental plots of 12 m² (3 m × 4 m), containing 15 rows spaced 20 cm apart. Seedbed preparation was conventional, using a medium depth tillage followed by two discs harrowing in early autumn. On November 16th,

Table 1. Weather conditions during 2018-2019 growing season at the experimental station under the Higher School of Agriculture of Mateur, Tunisia.

Month	Rainfall (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)
November	120	20	10
December	41	17	8
January	127	15	6
February	18	16	6
March	34	19	8
April	16	21	10
May	22	23	11
Total rainfall	378	-	-
Average	-	18.71	8.43

Table 2. Selected properties of soils used during greenhouse and open-field experiments at the experimental station under the Higher School of Agriculture of Mateur, Tunisia.

Properties	Value	Unit
pH	8.65	-
EC	0.14	dS m ⁻¹
OM	2.06	%
C	1.19	%
TN	0.26	%
C/N ratio	4.57	-
CaCO ₃	18.67	%
Sandy	18	%
Loam	55	%
Clay	23	%
Texture	Clay-silty	-

EC: electrical conductivity; OM: organic matter; TN: total nitrogen; CaCO₃: total calcium carbonate; P: phosphorus; C/N: carbon to nitrogen ratio. Data are presented as means of three replicates (n = 3).

2018, the crop combination was hand sown. The final plant density was 250 grains m⁻², considering 50, 50 and 150 seeds m⁻² of oat, triticale and vetch, respectively.

A dosage of 1.4 kg of mycorrhizae was administered immediately after sowing along the rows at a rate of 3 g m⁻¹, or 180 g per unit. In terms of bacterial inoculum, fresh preparations of individual strains (109 bacteria mL⁻¹) were done and mixed equally to generate a bacteria consortium (2 L ha⁻¹), then diluted with well water (1/20) and finally sprayed manually along the seeding line using a portable hand spray. In order to reduce UV light interaction with bacterial viability, the injection of inoculum was

done after seedling emergence (December 8th, 2018) in the late afternoon. The volume applied ensured enough soil moisture and an expected bacterial density 4×10^7 CFU m⁻².

The crop mixture was harvested 74 and 142 d after sowing, which corresponds to BBCH stages 31 and 55 for cereals, respectively (Lancashire *et al.*, 1991).

Pot experiment

This experiment was carried out under controlled conditions, in order to assess the root development of cereals and vetch. Fresh aerial weight (FAW), fresh root weight (FRW) and root length (RL) were recorded. Nodulation variables such as the number (NodN) and weight (NodW) of vetch nodules were assessed. Thus, roots were separated from the shoots and washed with water to remove adhering soil particles. The nodules were recovered from the roots and counted.

Sixteen pots (25 cm diameter × 40 cm height) were placed in a semi-closed environment at Higher School of Agriculture of Mateur during the 2018-2019 growing season. The same protocol was used in order to simulate the same conditions of the field experiment. Soil was collected from the surface layer (0-40 cm) of a single field, sieved (2 mm mesh size) and mixed with perlite. Each plastic pot was filled with 10 kg of substrate composed by 30 % in volume of perlite and 70 % of agricultural soil. For each pot, 15 seeds (five seeds per species) were sown on November 16th, 2018 and thinned to three plants per species after emergence. Irrigation was applied with tap water to reach soil moisture with 100 % water-holding capacity.

The control treatment (C) consisted of seeds without inoculation with a rate of 50 kg ha⁻¹ of DAP, equivalent to 1 g DAP per pot. The inoculation treatments were as follows: 2 g of mycorrhizal inoculum (M), 30 mL of bacterial inoculum (B) adding 15 mL at sowing and 15 d after emergence, and the mixture of mycorrhizae and bacterial (B+M) by adding 1 g of mycorrhizal inoculum and 30 mL of bacterial inoculum containing about 10⁹ bacteria per mL.

For cereals and legumes, root characteristics were determined 14 d after sowing at stage 11 and 13 on the BBCH scale (Meier *et al.*, 2009), respectively.

Traits measurement

Measurement of traits in this study included morphological, physiological and forage qualities, which were determined in the field experiment, while the root characteristics were measured under greenhouse conditions. The height measurements were performed using a marked ruler on 10 plants from each experimental unit. Three measurements of height growth at the two harvesting stages (74 and 142) were taken. The leaf:stem ratio was measured after drying leaves and stems in an oven at 65 °C for 72 h for dry matter content determination.

Indirect chlorophyll content in leaf tissues was measured on six plants per crop species randomly taken from each plot at the two harvesting dates. Measurements were performed using a portable meter (Minolta SPAD 502m; Plainfield, IL, USA). For

Leaf area, data were collected from 20 plants at two central rows of each plot 74 and 142 d after sowing for the three species. Single leaf area was measured using an LI-3100 leaf area meter device (LI-COR; Lincoln, NE, USA).

To determine the effect of the inoculation treatments on N, P and Ca uptake, the content of these nutrients in the three species aboveground tissues was measured as it is described. Total nitrogen was measured using the Kjeldahl method (Nelson and Sommers, 1980); the amount of crude protein was calculated by multiplying the percentage of N by 6.25; the SAAF method (ISO6869:2000) was used to assess the calcium content of plants (Ca), and plant phosphorus concentration (P) was assessed using a spectrophotometric approach (ISO 6491:1998). At the first harvest date, the leaf nitrate (NO_3^-) content was determined on 20 g of fresh leaves cut into thin strips and crushed until juice was extracted, which was then analysed with nitrate-check NO_3^- meter LAQUA twin (HORIBA; Irvine, CA, USA).

For each crop, the net area of individual experimental plot was hand harvested separately, discarding the borders rows. Dry matter (DM) content was assessed through oven drying a known amount of representative fresh samples from each plot just after harvest, at 70 ± 2 °C for 48 h. The yield as dry matter (YDM) was then calculated by multiplying DM content by the green fodder yield. At harvest, plant samples from each plot were collected, oven-dried, mixed, powdered, and kept for further quality variables analyses. The crude fibre (CF) was determined using FIBERSAC procedures outlined by ANKOM method (AOCS procedures Ba 6a-05). Ash (Ash) content was determined after burning the samples in muffle furnace at 550 °C for 10 h.

Statistical analyses

All collected data were tested for normality using Kolmogorov-Smirnov test. Analysis of variance was then performed using IBM SPSS Advanced Statistics, version 22. The inoculum application was considered as fixed factor. The Tukey's test at $p < 0.05$ was used for means comparison.

RESULTS AND DISCUSSION

Choosing the appropriate combination among forage species is of prime importance to enhance either forage yield, or forage quality traits of a crop mixture (Iannucci *et al.*, 2006). The introduction of beneficial bio-fertilizers is recognized as a powerful natural way of providing nutrients to plants and preserving the environment in a natural and environment-friendly way (Yadav and Smritikana, 2019). Accordingly, this research aims to contribute to our knowledge on the positive effects of combining inoculation sources and intercropping, as well as to assess at how much extent this strategy would improve morphological and physiological traits, yield and quality of a multi-specific crop mixture.

Agro-morphological variables of vetch and cereals under controlled conditions

The analysis of variance showed that vetch and cereals agro-morphological variables (FAW, FRW, RL, NodN, NodW) were significantly ($p < 0.001$) dependent on inoculation

treatments, except vetch for which AFW was unaffected (Table 3). Overall, for either vetch or cereals, means comparison showed that the highest AFW and RFW were obtained on the plants treated with B and the combination B+M. Our findings are in full agreement with those reported by Ertekin and Cakmakçi (2020). Compared to the control, vetch plants treated with B provided 15 and 30 % more AFW and RFW, respectively.

Regarding the cereals, B+M treatments improved AFW and RFW by 50 and 30 % (Table 3). The observations described above are in line with those reported by Xin *et al.* (2014), who demonstrated that an optimal combination of bacterial and mycorrhizal is able to improve dry biomass weight in different plant species. In addition, the highest RL was obtained for all species treated with bacteria, reaching 23 cm and 25 cm for vetch and cereals, respectively. The lowest values were recorded in the control treatment, averaging 11 cm and 17.67 cm for vetch and cereal plants, respectively (Table 3). These results might be related to the indigenous nature of the bacteria used, which makes them more suited to the environment. Furthermore, mycorrhizae would take more time to grow and to colonize their surroundings; therefore, their effect is likely to be delayed. For NodN, the highest value was obtained with M treatment (30 % higher than the control). However, maximum value of NodW was recorded in untreated plants (10.53 mg).

The beneficial effect of bacteria on nodulation has been widely documented (Kidaj *et al.*, 2012). Nonetheless, the decreasing NodN obtained with the dual inoculation by rhizobia bacteria and AMF could be attributed to the competition among the different AMF applied and those already naturally present in the soil, which would affect the final extent of plant colonization.

Morphological variables under field conditions

In the field, the differences among treatments were more pronounced at the second harvest (142 d after sowing), mainly due to the to the adapting duration of

Table 3. Effect of inoculation treatments on agro-morphological variables of vetch and cereal plants.

Treatments	FAW (g)		FRW (g)		RL (cm)		NodN	NodW
	Intercropping species							
	Vetch	Cereals	Vetch	Cereals	Vetch	Cereals	Vetch	Vetch
C	0.21a	0.11c	0.20c	0.12d	11.00d	17.67b	12.67c	10.53a
M	0.19a	0.18b	0.27ab	0.18c	17.00c	23.33a	18.17a	7.87c
B	0.23a	0.16b	0.28a	0.27b	23.00a	25.00a	15.00b	8.77b
M+B	0.18a	0.22a	0.25b	0.45a	20.00b	23.00a	14.67b	9.07b
ANOVA	ns	***	***	***	***	***	***	***

FAW: fresh aerial weight; FRW: fresh root weight; RL: root length; NodN: nodules number; NodW: nodules weight. Significant at ** $p < 0.01$ and *** $p < 0.001$; ns: non-significant. Means followed by different letters show statistical difference (Tukey, $p < 0.05$).

biofertilizers. In most cases, significant variation among inoculation treatments for the tested morphological traits (height and leaf:stem ratio) were observed, at both harvest dates for individual species. However, no significant differences were recorded for height among the treated plants 74 d after sowing (Figure 1). At the first harvest (74 d after sowing), among the four treatments, the mean leaf:stem ratio was observed on the plants subjected to M+B, C and M+B for vetch, oat, and triticale respectively. At the second harvest, application of the combined M+B resulted in 7 % extra height compared to the control for oat and vetch, respectively. For triticale, plants treated with B recorded the tallest plants (Figure 1A). Regarding leaf:stem ratio, mycorrhiza and bacteria applications increased leaf:stem ratio values for oat and vetch with 38 and 19 %, respectively, compared to the corresponding controls. Whereas, for triticale plants, very slight differences were obtained after inoculum applications (Figure 1B).

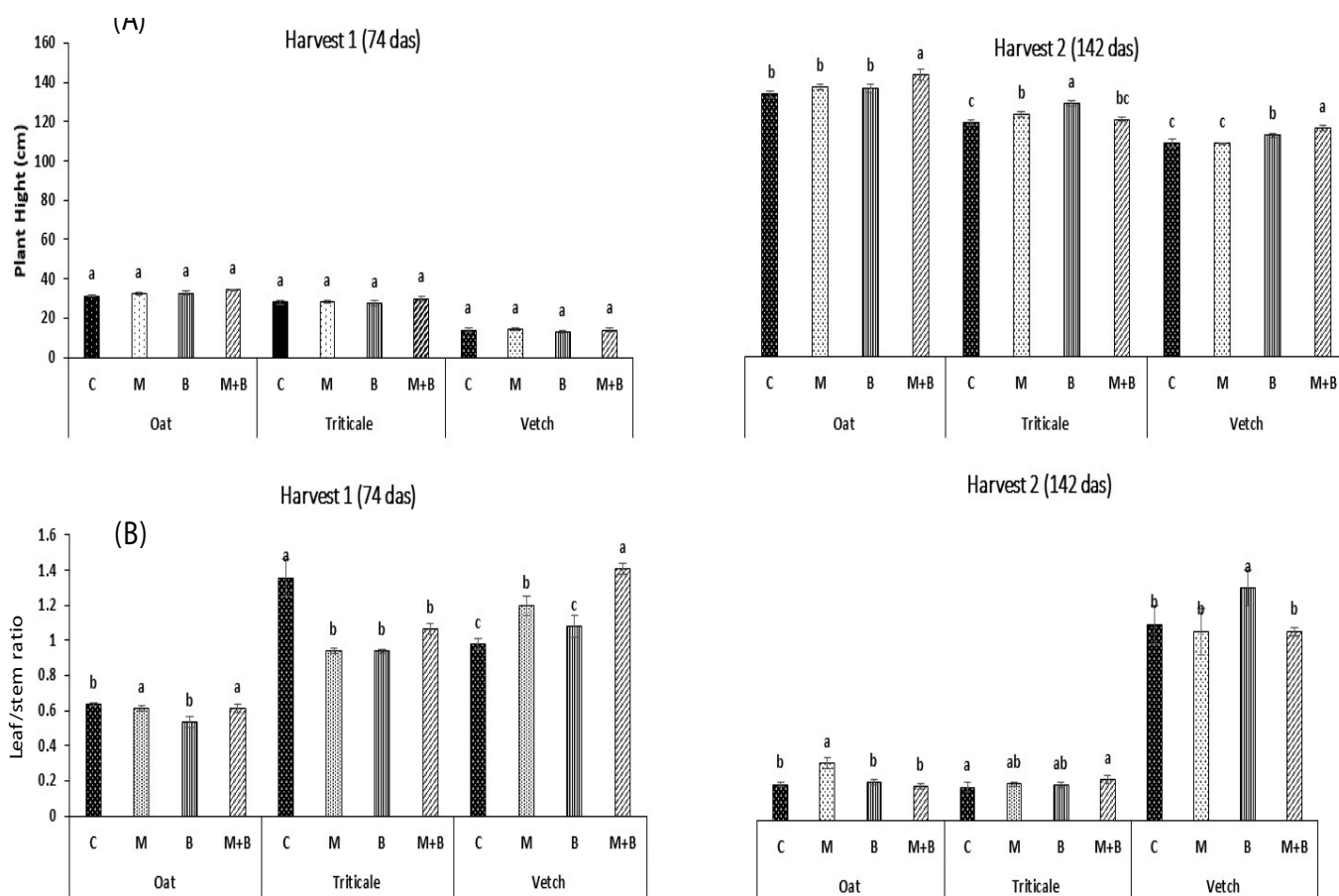


Figure 1. (A) plant height and (B) leaf:stem ratio at two harvesting dates; harvest 1 (74 d after sowing, das) and harvest 2 (142 das), under four inoculation treatments for oat, triticale and vetch. C: control; M: mycorrhizae inoculum; B: bacterial inoculum; M+B: dual mycorrhizae and bacterial inoculum. For each crop, means followed by different letters indicate statistical difference (Tukey, $p < 0.05$).

Changes of physiological variables under field conditions

Among different inoculation treatments, significant differences in SPAD and LA values were recorded (Figure 2). At the first harvest, the bacterial inoculum application enhanced SPAD values by 11 % for the two crops oat and vetch. For triticale, SDAP values were improved in plants treated with M+B. Only triticale plants showed substantial variation during the second harvest, with a preponderance of bacteria-inoculated plants showing 16 % higher values than the control. (Figure 2A). Overall, LA varied significantly from 206 to 536 cm².per plant. In particular, plants treated with M+B showed an improvement of LA compared to the control with 29, 20 and 15 % for oat, vetch and triticale crops, respectively. At the second harvest, the prevalence of the combined M+B treatments plants were detected only for vetch and triticale. In contrast, LA values for oat declined with inoculum applications (Figure 2B).

Changes in nutrient values under field conditions

N, P and Ca uptake by crops was significantly affected ($p < 0.01$) by inoculations. Specifically, all of them significantly improved their nutritional status when compared

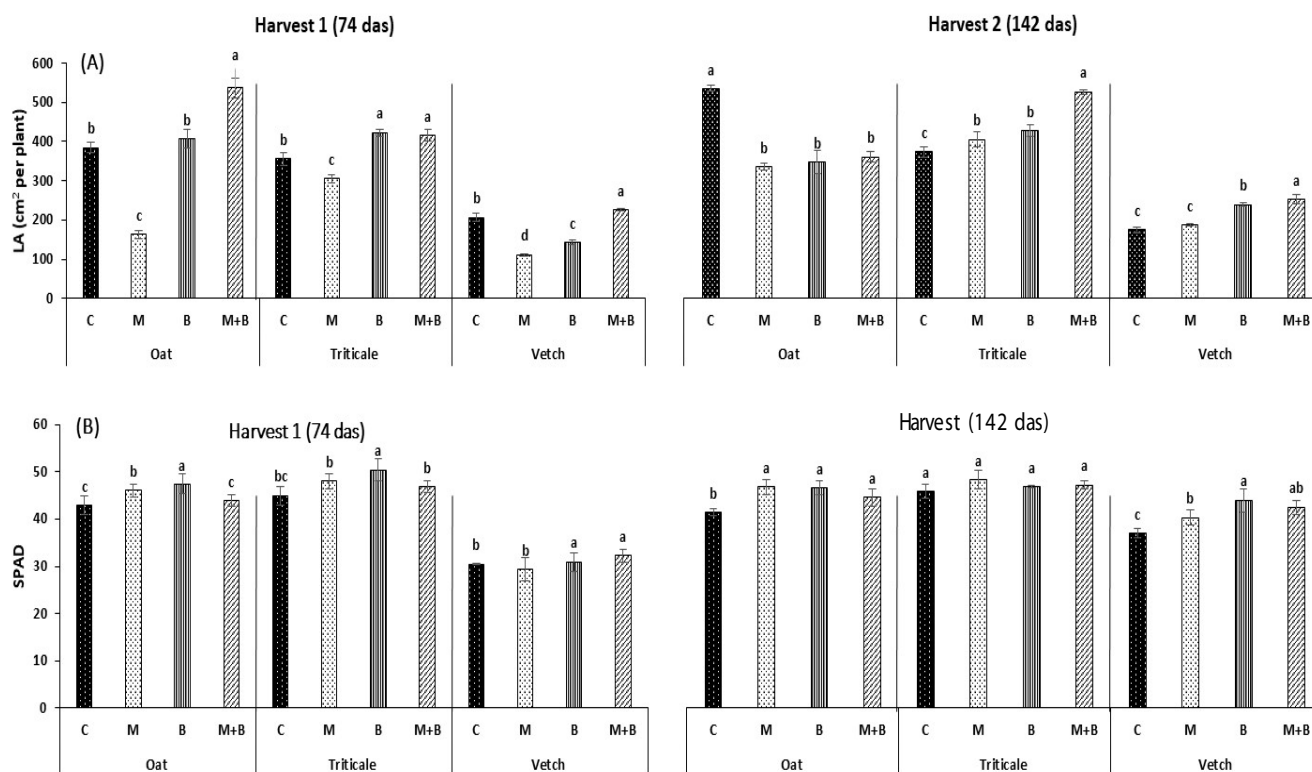


Figure 2. (A) leaf area and (B) SPAD units in oat, triticale and vetch under four inoculation treatments. C: control; M: mycorrhizae inoculum; B: bacterial inoculum; M+B: dual mycorrhizae and bacterial inoculum. For each crop, means followed by different letters indicate statistical difference (Tukey, $p < 0.05$).

to the corresponding controls (Figure 3). For CP, we recorded the maximum values for plants treated with M+B (16.9 %) and B (16.83 %) at the first and second harvest, respectively. The lowest values were found for untreated and mycorrhizae inoculated plants (Figure 3A). At the first harvest, inoculated plants with mycorrhizae surpassed the other treated plants for phosphorus uptake. This can be attributed to the ability of AMF to improve the efficiency of soil P uptake, which is otherwise difficult to be absorbed by plants in alkaline soils (Hou *et al.*, 2012). At the second harvest, the highest P uptake was recorded in plants inoculated with bacteria (Figure 3B). The differences among the three species could be due to changes in root morphology, which is proven to alter mycorrhizal colonization of the rhizosphere.

In regard to Ca uptake, we recorded a 23 % improvement with the three inoculum treatments at 42 das. Nonetheless, at 142 das, there was no significant effect of inoculation on Ca uptake (Figure 3C). Additionally, the gain in leaf nitrate (NO₃⁻) content was only noticeable in the plants inoculated with the bacteria and mycorrhizae combination with 40.52, 53.11 and 54.54 % higher values compared to the control plants for oat, triticale and vetch, respectively (Table 4). It can be stated that the inoculation

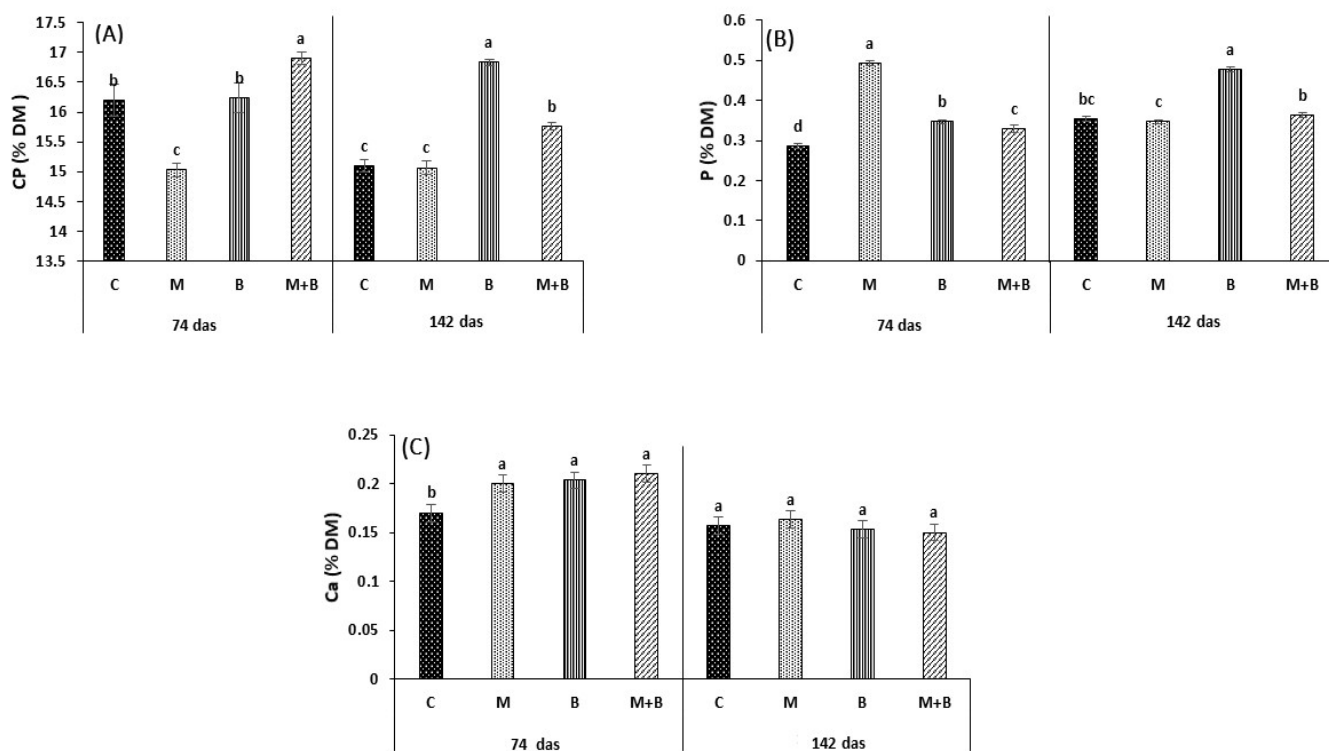


Figure 3. Contents in dry matter of crude protein (A), phosphorus (B) and calcium (C) leaf tissues of oat, triticale and vetch plants under four inoculation treatments. CP: crude protein; C: control; M: mycorrhizae inoculum; B: bacterial inoculum; M+B: dual mycorrhizae and bacterial inoculum. For each crop, means followed by different letters indicate statistical difference (Tukey, $p < 0.05$).

Table 4. Nitrate (NO₃) content in leaf tissues of oat, triticale and vetch plants under four inoculation treatments. C: control; M: mycorrhizae inoculum; B: bacterial inoculum; M+B: dual mycorrhizae and bacterial inoculum

Species Treatments	Oat	Triticale	Vetch
C	451.67d±17.5	578.33c±16.0	583.33d±25.1
M	630.00b±10.	573.33c±15.0	1213.33b±104.0
B	567.00c±7.0	703.33b±15.0	1050.00c±50.0
M+B	714.00a±15.0	1233.33a±58.0	1283.33a±28.0
ANOVA	***	***	***

Analysis of variance; significant at *** $p < 0.001$. For each crop, means followed by different letters indicate statistical difference (Tukey, $p < 0.05$).

of rhizobacteria led to an improvement in microbial biomass due to the mutually beneficial relationship which improved the uptake of soil nutrients (Zaidi *et al.*, 2017). Mpairwe *et al.* (2002) reported similar results, they found that intercropping cereals and forage legumes increased plant protein content. Mostly due to the hyphal network and nodules, which facilitate the movement of nutrients and carbohydrates from legume to cereal crops (Megueni *et al.*, 2011). Rodriguez *et al.* (2020) demonstrated a good structuring effect of the legume root system increased soil biodiversity and improved availability of nutrients from compounds that would otherwise be inaccessible to the cereal root systems.

Forage quality and yield

Variance analysis showed a significant variation of the quality indicators with inoculation treatments. Overall, a slight difference was obtained for crude protein at the two harvest dates. Particularly, the highest CP was found at 142 das for control and treated plants (Figure 4A).

For the ash property, the highest values were recorded at the first harvest (74 das). Compared to the control plants, all treatments gained ash values with a maximum for mycorrhizal plants (7.7 %). At 142 das, plants inoculated with B and B+M produced more ash than other treated or untreated plants (Figure 4B). These results are similar to Sibi *et al.* (2015) and Heydarzadeh *et al.* (2022), who demonstrated the positive effect of these inoculum on the ash content for corn intercropping with green beans. It has been also published that inoculation with mycorrhizae increased ash content, given its beneficial role in promoting nutrient uptake, by adjusting pH or enzyme release (Puzynska *et al.*, 2021).

Furthermore, various inoculations resulted in a considerable increase in DM yield. On average, at both harvest dates, plants treated with M+B had the highest yield values, followed by plants treated with B (Figure 5). In particular, compared to control, the

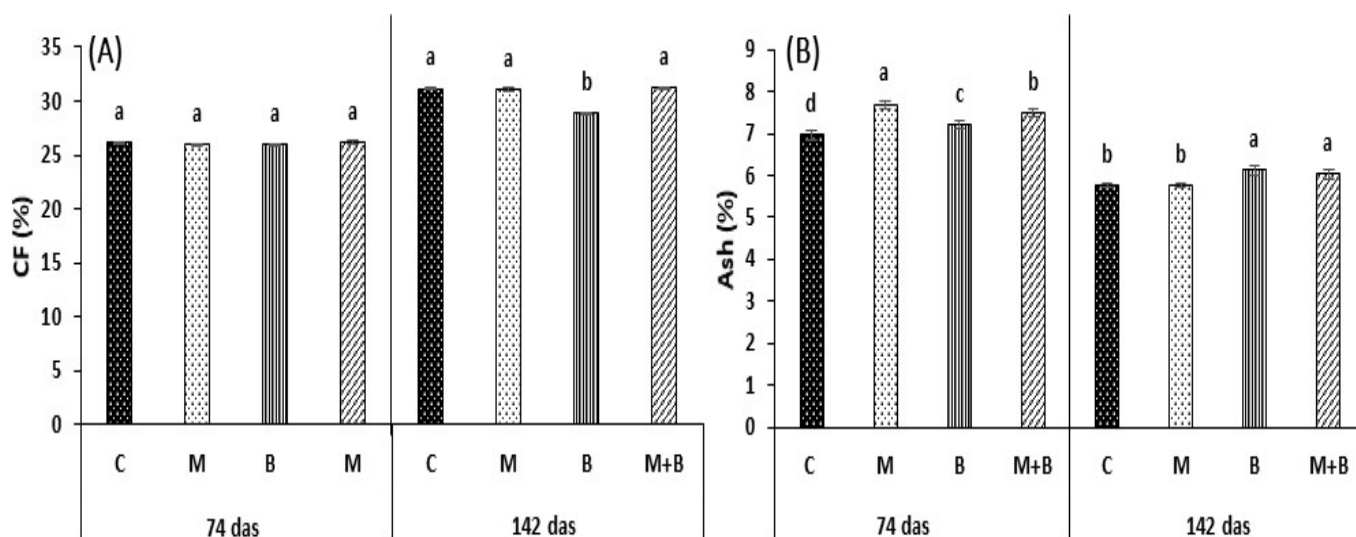


Figure 4. Variation of crude fibre (A) and ash (B) under four inoculation treatments for vetch, oat and triticale. C: control; M: mycorrhizae inoculum; B bacterial inoculum; M+B: dual mycorrhizae and bacterial inoculum.

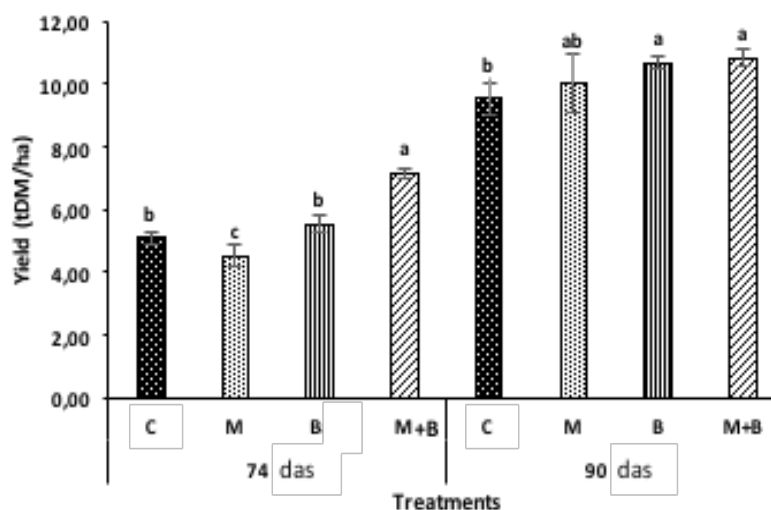


Figure 5. Dry matter yield affected by different inoculation treatments; C: control, M: mycorrhizae inoculum, B: bacterial inoculum and M+B: the dual inoculation mycorrhizae and bacterial inoculum, at the two harvested dates (74 and 142 d after sowing).

dual M+B inoculum improved significantly the DM yield by 41.2 %, corresponding to 2.1 and 1.67 Mg at 74 and 142 das, respectively (Figure 5). The increase in yield dry matter for inoculated plants is attributed to the positive effect of PGPR and mycorrhizal on root growth, which helps in more absorption of water and nutrients. According to

Sahoo *et al.* (2013), these microbial associations include many natural microorganisms which improve soil physicochemical properties, crops yield, soil health and plants growth.

CONCLUSIONS

The use of vetch-oat-triticale intercropping combined to mycorrhizae and bacterial biofertilizers provides an effective way to increase land use efficiency for smallholder farmers. More interestingly, this study highlighted how using a combination of biofertilizers could assist farmers to achieve higher fodder yields in terms of quantity and quality. Further research into the exact mechanisms of these biofertilizers, as well as their interactions with specific crop species, is needed.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study is in line with the activities of ATAE and AAG associations and was financially supported by these associations and the Tunisian Ministry of Agriculture.

REFERENCES

- Abdelkrim S, Harzalli Jebara S, Saadani O, Jebara M. 2018. Potentialities of efficient and resistant Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Pb uptake and defensive system stimulation of *Lathyrus sativus* under lead stress. *Plant Biology* 20 (5): 857–869. <https://doi.org/10.1111/plb.12863>
- Agegnehu G, Ghizaw A, Sinebo W. 2008. Yield potential and land-use efficiency of wheat and faba bean mixed intercropping. *Agronomy for Sustainable Development* 28: 257–263. <https://doi.org/10.1051/agro:2008012>
- Anil L, Park RHP, Miller FA. 1998. Temperate intercropping of cereals for forage A review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass Forage Science* 53 (4): 301–317. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.1998.00144.x>
- Beya S. 2018. Caractérisation d'une association fourragère tri-spécifique Triticale- avoine noire-vesce velue. Projet de fin d'études. ESA-Mateur: Bizerte, Tunisie. 77 p.
- Compant S, Duffy B, Nowak J, Clément C, Barka EA. 2005. Use of plant growth promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action and future prospects. *Applied and Environmental Microbiology* 71 (9): 4951–4959. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005>
- Dar SA, Lone FA, Dar SA, Bhat RA, Bashir I, Mir SA, Dar ZA. 2020. Biofilm: an innovative modern technology for aquatic pollution remediation. *In: Bioremediation and Biotechnology Vol 2*. Bhat R, Hakeem K, Dervash M. (eds.); Springer: Cham. pp: 207–219. https://doi:10.1007/978-3-030-40333-1_12
- Ertekin I, Çakmakçi S. 2020. Effect of different rates of bacteria (*Rhizobium leguminosarum*) inoculated in seed on yield and some quality parameters of common vetch (*Vicia sativa* L.). *Journal of Agriculture and Nature* 23 (2): 343–349. <https://dx.doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.562310>
- Ferchichi N, Toukabri, W, Vrhovsek U, Angeli A, Masuero D, Mhamdi R, Trabelsi D. 2019. Inoculation of *Lupinus albus* with the nodules-endophyte *Paenibacillus glycanilyticus* LJ121 improves grain nutritional quality. *Archives of Microbiology* 202: 283–291. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01745-6>
- Glick BR. 2012. Plant growth promoting bacteria: mechanisms and applications. *Hindawi Scientifica* 2012: 1–15 p. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Graham PH, Vance, CP. 2003. Legume importance and constraints to greater use. *Plant Physiology* 131 (3): 872–877. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.017004>

- Hammami S, Le Roux C, Dhane-Fitouri S, De Lajudie P, Duponnois R, Ben Jeddi F. 2019. Genetic diversity of rhizobia associated with root nodules of white lupin (*Lupinus albus* L.) in Tunisian calcareous soils. *Systematic and Applied Microbiology* 42 (4): 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2019.04.002>
- Hashemi M, Farsad A, Sadeghpour A, Weis SA, Herbert SJ. 2013. Cover crop seeding date influence on fall nitrogen recovery. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176 (1): 69–75. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200062>
- Heydarzadeh S, Jalilian J, Pirzad A, Jamei R, Petrusa E. 2022. Fodder value and physiological aspects of rainfed smooth vetch affected by biofertilizers and supplementary irrigation in an agri-silviculture system. *Agroforestry Systems* 96: 221–232. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00695-7>
- Iannucci A, Carroni AM, Martiniello P. 2006. Performances of legume-grass mixtures under different cutting managements in Mediterranean environments. *Italian Journal of Agronomy* 1 (3): 359–368. <https://doi.org/10.4081/ija.2006.359>
- Kamalongo DM, Cannon ND. 2020. Advantages of bicropping field beans (*Vicia faba*) and wheat (*Triticum aestivum*) on cereal forage yield and quality. *Biological Agriculture and Horticulture* 36 (4): 213–229. <https://doi.org/10.1080/01448765.2020.1788991>
- Kang Y, Kim M, Shim C, Bae S, Jang S. 2021. Potential of Algae-Bacteria Synergistic Effects on Vegetable Production. *Frontiers in Plant Science* 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.656662>
- Kidaj D, Wielbo J, Skorupska A. 2012. Nod factors stimulate seed germination and promote growth and nodulation of pea and vetch under competitive conditions. *Microbiological Research* 167 (3): 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2011.06.001>
- Lancashire P, Bleiholder H, Vandenboom T, Langeluddeke P, Stauss R, Weber E, Witzemberger A. 1991. A uniform decimal code for growth-stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology* 119 (3): 561–601. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x>
- Meier U, Bleiholder H, Buhr L, Feller C, Hacks H, Hess M, Lancashire PD, Schnock U, Stauss R, Boom TVD. 2009. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants-history and publications. *Journal of Cultivated Plants* 61 (2): 41–52.
- Mohammad A, Mitra B, Khan AG. 2004. Effects of sheared-root inoculum of *Glomus intraradices* on wheat grown at different phosphorous levels in field. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103 (1): 245–249. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.017>
- Papastylianou I. 2004. Effect of rotation system and N fertilizer on barley and common vetch grown in various crop combinations and cycle lengths. *The Journal of Agricultural Science* 142 (1): 41–48. <https://doi.org/10.1017/S0021859604004009>
- Pertot I, Alabouvette C, Hinarejos Esteve E, Franca S. 2016. Focus group soil-borne diseases mini-paper. The use of microbial biocontrol agents against soil-borne diseases. 11 p.
- Puzynska K, Synowiec A, Puzyński S, Bocianowski J, Klima K, Lepiarczyk A. 2021. The performance of oat-vetch mixtures in organic and conventional farming systems. *Agriculture* 11 (4): 332. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040332>
- Qin AZ, Huang GB, Chai Q, Yu AZ, Huang P. 2013. Grain yield and soil respiratory response to intercropping systems on arid land. *Field Crops Research* 144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.12.005>
- Rosenblueth M, Ormeño-Orrillo E, López-López A, Rogel MA, Reyes-Hernández BJ, Martínez-Romero C, Redd PM, Martínez-Romero E. 2018. Nitrogen Fixation in cereals. *Frontiers in Microbiology* 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01794>
- Saharan BS, Nehra V. 2011. Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Science and Medical Research, LSMR-21*: 1–30.
- Sahoo RK, Ansari MW, Dangar TK, Mohanty S, Tuteja, N. 2013. Phenotypic and molecular characterization of efficient nitrogen fixing *Azotobacter* strains of the rice elds. *Protoplasma* 251: 511–523. <https://doi.org/10.1007/s00709-013-0547-2>
- Sibi M, Faryabi E, Marzban Z J. 2015. Assessment of forage corn quality intercropping with green beans under influence of Rhizobium bacteria and arbuscular mycorrhizal fungus. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences* 6 (5): 418–424.

- Stomph T, Dordas C, Baranger A, de Rijk J, Dong B, Evers J, Gu C, Li L, Simon J, Jensen ES, Wang Q, Wang Y, Wang Z, Xu H, Zhang C, Zhang L, Zhang WP, Bedoussac L, van der Werf W. 2020. Chapter one - Designing intercroops for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles? *Advances in Agronomy*, Academic Press 160 (1): 1–50. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.10.002>
- Thomas L, Singh I, 2019. Microbial Biofertilizers: Types and Applications. *In: Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment (Soil Biology Vol 55)*. Giri B, Prasad R, Wu QS, Varma A. (eds.); Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_1
- Yadav K, Smritikana S. 2019. Impact on soil fertility and crop productivity under sustainable agriculture. *Environment and Ecology* 37 (1): 89–93.
- Youseif SH. 2018. Genetic diversity of plant growth promoting rhizobacteria and their effects on the growth of maize plants under greenhouse conditions. *Annals of Agricultural Sciences* 63 (1): 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2018.04.002>
- Zaidi A, Khan M, Rizvi A. 2017. Role of Phosphate Solubilizing Bacteria in Legume Improvement. *In: Microbes for Legume Improvement*. Zaidi A, Khan M, Musarrat J. (eds.); Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59174-2_8

POTENCIAL AGRONÓMICO DE LOS BIOFERTILIZANTES SOBRE EL CRECIMIENTO, EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD NUTRICIONAL DE UN SISTEMA DE CULTIVO INTERCALADO DE VEZA, AVENA Y TRITICALE

Sana Dhane **Fitouri**^{1,2*}, Khaoula **Boudabbous**¹, Ali **Ben Romdhane**², Soumaya Tounsi **Hammami**¹, Wajdi **Dhib**², Faycel **Ben Jeddi**¹, Chahine **Karmous**³, Salah **Ben Youssef**⁴

¹ University of Carthage. National Agronomic Institute of Tunisia. Horticultural Sciences Laboratory, LR13AGR01, Tunisia.

² University of Carthage. Higher School of Agriculture of Mateur. Research Unit on Biodiversity and Resource Development in Mountainous Areas. Tabarka road, 7033 Mateur, Bizerte, Tunisia.

³ University of Carthage. National Agronomic Institute of Tunisia. Genetics and Cereal Breeding Laboratory, LR14AGR01, Tunisia.

⁴ University Tunis Carthage. National Institute of Agronomic Research of Tunisia (INRAT). Tunis, Tunisia.

* Autor para correspondencia: sanadhane2@gmail.com

RESUMEN

Los problemas existentes del cambio climático y el crecimiento de la población han llevado a una mayor conciencia de la necesidad de innovar en las prácticas agrícolas sostenibles, tales como los cultivos intercalados. La mejora de la eficiencia de los sistemas de cultivo intercalado por medio de la aplicación de microorganismos benéficos (rizobacterias, micorrizas o ambos) es un enfoque valioso. Se realizaron dos experimentos para evaluar el efecto de la inoculación con microorganismos benéficos: rizobacterias (B), micorrizas (M) y un consorcio rizobacterias-micorrizas (B+M), en comparación con un testigo de plantas no inoculadas (C) en un sistema de cultivo intercalado de veza-avena-triticale. Se determinaron el crecimiento, los rasgos fisiológicos, el rendimiento y las cualidades del forraje en dos períodos de cosecha (74 y 142 días después de la siembra, dds). En general, los diferentes cultivos intermedios estudiados variaron en cuanto a los efectos de la inoculación. La inoculación con micorrizas tuvo un efecto positivo significativo sobre el SPAD, el nitrógeno total y la relación hoja/tallo para veza, avena y triticale, respectivamente. La inoculación de las bacterias favoreció la superficie foliar y la altura de la planta en los cultivos de veza y avena, pero sólo la altura de la planta en el triticale. El inóculo dual de bacterias y micorrizas mejoró significativamente el rendimiento de materia seca (RMS) en un 41.2 % para asegurar un incremento de 2.1 y 1.67 Mg ha⁻¹ en 74 y 142 das respectivamente, en comparación con el testigo. Otros análisis de datos subsecuentes revelaron una mejora del estado del calcio (Ca) y del fósforo (P) tras la inoculación de micorrizas. Este estudio destacó las aplicaciones potenciales de los biofertilizantes duales en los cultivos intercalados de veza, avena y triticale como forma de aumentar el rendimiento y las cualidades del forraje en las regiones semiáridas.

Palabras clave: rizobacterias, micorrizas, rendimiento del forraje, calidad del forraje.

Citation: Fitouri SD, Boudabbous K, Ben Romdhane A, Hammami ST, Dhib W, Ben-Jeddi F, Karmous C, Ben-Youssef S. 2022. Potencial agronómico de los biofertilizantes sobre el crecimiento, el rendimiento y la calidad nutricional de un sistema de cultivo intercalado de veza, avena y trigo. *Agrociencia*. 56(7): 1224-1253. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2776>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: July 28, 2022.
Approved: October 30, 2022.
Published in Agrociencia:
December 07, 2022.

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



INTRODUCCIÓN

El cultivo simultáneo de dos o más especies en la misma área se conoce como cultivo intercalado (Stomph *et al.*, 2020). Este método de cultivo aumenta la producción, la biodiversidad y la estabilidad del agroecosistema, al tiempo que utiliza de manera eficaz la tierra, los nutrientes y los recursos hídricos (Kamalongo *et al.*, 2020). Los cultivos intercalados se basan en la intensificación de las funciones ecológicas y pueden mejorar la productividad de los cultivos al aumentar el coeficiente de utilización de la tierra (Agegnehu, 2008; Qin *et al.*, 2013) al tiempo que emiten cantidades menores significativas de gases de efecto invernadero en comparación con los cultivos individuales. En ambientes áridos y semiáridos, las mezclas de ciertas leguminosas anuales con cereales de invierno se utilizan de manera amplia en la producción de forraje (Papastylianou, 2004). En tales regiones, las mezclas de leguminosas y cereales han mostrado un gran potencial para aumentar el rendimiento del forraje y la conservación del suelo (Anil *et al.*, 1998). Por lo tanto, la ampliación de los estudios sobre los sistemas de cultivo intercalado, en particular de cereales y leguminosas, resulta esencial para promover y aumentar la calidad de los forrajes aptos para el ensilaje y para adaptar la gestión de los cultivos al cambio climático (Iannucci *et al.*, 2006).

Los sistemas que utilizan leguminosas como cultivo principal y cereales como cultivos intermedios ofrecen importantes ventajas, como un mayor rendimiento total y un uso más eficiente de la tierra (Jayanta *et al.*, 2018). Este sistema aumenta el rendimiento del forraje en relación con el peso seco debido a las gramíneas (Hashemi *et al.*, 2013), y mejora la calidad del alimento debido a la mayor concentración de proteína cruda (PC) de las legumbres. Más aún, el aumento en el rendimiento de los forrajes implica un gran uso de fertilizantes y pesticidas, lo cual aumenta el riesgo de contaminación del suelo y del agua (Dar *et al.*, 2020). A la par, también debilita las raíces de las plantas y las deja indefensas ante ciertos organismos patógenos. Por lo tanto, el avance de los biofertilizantes en los sistemas agrícolas es una necesidad imperiosa debido a la demanda de los consumidores de alimentos seguros y sin residuos. En este caso, el uso de inoculantes microbianos es una de las herramientas potenciales para lograr este objetivo (Pertot *et al.*, 2016). Algunas especies de los géneros *Sinorhizobium*, *Allorhizobium* y *Bradyrhizobium* constituyen un grupo importante de organismos benéficos para la agricultura. Al formar nódulos en las raíces de las especies de leguminosas hospederas, pueden aumentar la eficiencia de fijación del nitrógeno hasta 450 kg ha⁻¹ (Graham y Vance, 2003; Thomas y Singh, 2019).

Entre estos microbios benéficos, se sabe que las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) mejoran la absorción y utilización de nutrientes en las plantas. Las PGPR son un grupo de bacterias rizosféricas que pueden colonizar las raíces de las plantas y proporcionar efectos beneficiosos en la planta hospedera cuando están disponibles en poblaciones grandes. Los géneros *Rhizobia*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Pseudomonas* y *Burkholderia* se encuentran entre las PGPR más investigadas. Se ha descubierto que tienen muchos efectos benéficos sobre las plantas (Saharan, 2011) y que activan mecanismos directos e indirectos en beneficio de las plantas hospederas (Glick, 2012).

Se ha informado que el PGPB puede mejorar la disponibilidad de nutrientes del suelo, la nutrición y el crecimiento de las plantas, así como el rendimiento de una gran variedad de cultivos en todo el mundo, incluidos los cereales (Youseif, 2018), las legumbres (Ferchichi *et al.*, 2019), las hortalizas y las especias (Kang *et al.*, 2021). Además, tienen la capacidad de aumentar la resiliencia de las plantas frente a factores de estrés abiótico, como la alcalinidad, la salinidad, la sequía y los metales tóxicos (Abdelkrim *et al.*, 2018). Los rizobios también contribuyen a secretar hormonas vegetales que son necesarias para el crecimiento de las plantas (Rosenblueth *et al.*, 2018), y pueden proteger a las plantas de los microorganismos fitopatógenos (Compant *et al.*, 2005).

Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA), como fuente de biofertilizantes para mejorar la nutrición mineral de las plantas, podrían minimizar en manera significativa los aportes de fertilizantes y mantener rendimientos agrícolas adecuados (Mohammad *et al.*, 2004). Los HMA también mejoran la absorción por parte de las plantas de otros macronutrientes como el nitrógeno (N), el potasio (K) y el magnesio (Mg) (Labidi *et al.*, 2012).

Para responder a dos preguntas principales, se realizó un ensayo de investigación sobre la veza, la avena y el triticale, en cultivo mezclado con presencia o ausencia de micorrizas, bacterias y un consorcio mixto, durante dos tiempos de corte. Las preguntas planteadas son ¿tiene la presencia de estos inóculos un impacto diferente en las características agrícolas morfológicas y fisiológicas, así como en la absorción de nutrientes, en las tres especies en cultivo mezclado? y ¿qué papel desempeñan estos inóculos en el aumento del rendimiento y la calidad del forraje?

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal, tratamientos y sitio de investigación

El material vegetal utilizado en este estudio consistió en dos cereales forrajeros: avena negra (*Avena strigosa*) cv. Saia. y triticale (*x Triticosecale*) cv. Our., y una especie de leguminosa forrajera, la veza peluda (*Vicia villosa*) cv. Sejnane. Estos tres componentes de la mezcla se eligieron con base en un estudio anterior en el cual se evidenció la ventaja de los cultivos intercalados por medio de LER (Land Equivalent Ratio) (Beya, 2018).

A la mezcla se le asignaron cuatro tratamientos de inoculación diferentes; 1) inóculo micorrícico M: un producto comercial originario de Francia (Symbivit); 2) inóculo bacteriano B: un consorcio de tres cepas (pendiente de patente) aisladas de nódulos del lupino blanco (*Lupinus albus*). Estas tres cepas pertenecen a la especie *Agrobacterium radiobacter*, no son antagonistas y tienen efectos de PGPR (Hammami *et al.*, 2019); 3) un inóculo combinado de micorrizas y bacterias (M+B); y 4) el tratamiento de control (C), sin inoculación más una tasa reducida de 50 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP). El experimento se realizó en las temporadas de cultivo 2018–2019 en la estación experimental de la Escuela Superior de Agricultura de Mateur, situada en el noroeste de Túnez (37° 03' N, 9° 36' E). Esta región tiene un clima semiárido con precipitaciones anuales de 560 mm y temperaturas medias anuales del aire de 17.07 °C; se muestran las condiciones meteorológicas durante la temporada experimental (Cuadro 1). El tipo

Cuadro 1. Condiciones meteorológicas durante la temporada de cultivo 2018-2019 en la estación experimental de la Escuela Superior de Agricultura de Mateur, Túnez.

Mes	Precipitación (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)
Noviembre	120	20	10
Diciembre	41	17	8
Enero	127	15	6
Febrero	18	16	6
Marzo	34	19	8
Abril	16	21	10
Mayo	22	23	11
Precipitación total	378	-	-
Promedio	-	18.71	8.43

de suelo del sitio experimental, clasificado como vertisol, tenía una textura arcillo-limosa. Se presentan las propiedades físicas y químicas del suelo a 0–40 cm de profundidad (Cuadro 2).

Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se dividió en dos ensayos, el primero se realizó en campo y el segundo en macetas.

Establecimiento del experimento en campo

El experimento de campo se llevó a cabo en condiciones de lluvia. Se distribuyó un experimento factorial de una vía (cuatro tratamientos, cuatro réplicas por tratamiento)

Cuadro 2. Propiedades seleccionadas de los suelos utilizados durante los experimentos en invernadero y en campo abierto en la Escuela Superior de Agricultura de la estación experimental de Mateur, Túnez.

Propiedades	Valor	Unidad
pH	8.65	-
CE	0.14	dS m ⁻¹
MO	2.06	%
C	1.19	%
NT	0.26	%
Relación C/N	4.57	-
CaCO ₃	18.67	%
Arenoso	18	%
Limoso	55	%
Arcilloso	23	%
Textura	Franco-arcilloso	-

CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; TN: nitrógeno total; CaCO₃: carbonato cálcico total; P: fósforo; C/N: relación carbono/nitrógeno. Los datos se presentan como medias de tres repeticiones (n = 3).

por medio de un diseño completamente aleatorio en 16 parcelas experimentales de 12 m² (3 m × 4 m) que contenían 15 filas separadas 20 cm entre sí. La preparación del lecho de siembra fue convencional, se utilizó un laboreo de profundidad media seguido de dos pasos de rastra de disco a principios de otoño. En 16 noviembre 2018 se sembró a mano la combinación de cultivos. La densidad de plantas final fue de 250 granos m⁻², se consideraron 50, 50 y 150 semillas m⁻² de avena, triticale y veza, respectivamente. Se administró una dosis de 1.4 kg de micorrizas inmediatamente después de la siembra a lo largo de las hileras a una tasa de 3 g m⁻¹, o 180 g por unidad. En cuanto al inóculo bacteriano, se hicieron preparaciones frescas de cepas individuales (109 bacterias mL⁻¹) y se mezclaron por igual para generar un consorcio bacteriano (2 L ha⁻¹), luego se diluyeron con agua de pozo (1/20) y finalmente se rociaron manualmente a lo largo de la línea de siembra con un rociador manual portátil. Para reducir la interacción de la luz ultravioleta con la viabilidad bacteriana, la inyección del inóculo se realizó después de la emergencia de las plántulas (8 diciembre 2018) al final de la tarde. El volumen aplicado aseguraba una humedad suficiente en el suelo y la densidad bacteriana prevista 4 × 10⁷ UFC m⁻².

La mezcla de cultivos se cosechó 74 y 142 d después de la siembra, lo que corresponde a las etapas 31 y 55 de BBCH para los cereales, respectivamente (Lancashire *et al.*, 1991).

Experimento en macetas

Este experimento se llevó a cabo en condiciones controladas, con el fin de evaluar el desarrollo de las raíces de los cereales y la veza. Se registraron el peso fresco parte aérea (PFA), el peso fresco de la raíz (PFR) y la longitud de la raíz (LR). Se evaluaron variables de nodulación como el número (NodN) y el peso (NodW) de los nódulos de veza. Para ello, las raíces se separaron de la parte aérea y se lavaron con agua para remover las partículas de suelo adheridas. Los nódulos se recuperaron de las raíces y se contaron.

Se colocaron 16 macetas (25 cm × 40 cm, diámetro × altura) en un ambiente semicerrado en la Escuela Superior de Agricultura de Mateur durante la temporada de cultivo 2018-2019. Se utilizó el mismo protocolo para simular las condiciones del experimento de campo. La tierra se recogió de la capa superficial (0-40 cm) de un mismo campo, se tamizó (tamaño de malla de 2 mm) y se mezcló con perlita. Cada maceta de plástico se llenó con 10 kg de sustrato compuesto por un 30 % en volumen de perlita y un 70 % de tierra agrícola. Para cada maceta, se sembraron 15 semillas (cinco semillas por cada especie) en 16 noviembre 2018, con aclareo a tres plantas para cada especie después de que emergieron. El riego se aplicó con agua del grifo para alcanzar una humedad del suelo con una capacidad de retención de agua del 100 %.

El tratamiento de control (C) consistió en semillas sin inocular con una tasa de 50 kg ha⁻¹ de DAP, equivalente a 1 g de DAP por maceta. Los tratamientos de inoculación fueron los siguientes: 2 g de inóculo micorrízico (M), 30 mL de inóculo bacteriano (B) añadidos 15 mL a la siembra, 15 d después de la emergencia y la mezcla de micorrizas

y bacterias (B+M) añadido 1 g de inóculo micorrícico y 30 mL de inóculo bacteriano que contenía unas 109 bacterias por mL.

En el caso de los cereales y las leguminosas, las características de las raíces se determinaron 14 d después de la siembra, en la fase 11 y 13 de la escala BBCH (Meier *et al.*, 2009), respectivamente.

Medición de características

La medición de las características en este estudio incluyó cualidades morfológicas, fisiológicas y de forraje que se determinaron en el experimento de campo; en tanto que las características de las raíces se midieron en condiciones de invernadero. Las mediciones de altura se realizaron con una regla graduada en 10 plantas de cada unidad experimental. Se realizaron tres mediciones del crecimiento en altura en las dos etapas de cosecha (74 y 142). La razón hojas:tallo se midió después de secar las hojas y los tallos en una estufa a 65 °C durante 72 h para determinar el contenido de materia seca. El contenido indirecto de clorofila en los tejidos foliares se midió en seis plantas por especie de cultivo tomadas al azar de cada parcela en las dos fechas de cosecha. Las mediciones se realizaron con un medidor portátil (Minolta SPAD 502m; Plainfield, IL, USA). Para el área foliar, se registraron datos de 20 plantas en las dos filas centrales de cada parcela 74 y 142 d después de la siembra para las tres especies. El área de una hoja se midió con un dispositivo medidor de área foliar LI-3100 (LI-COR; Lincoln, NE, USA).

Para determinar el efecto de los tratamientos de inoculación sobre la absorción de N, P y Ca, se midió el contenido de estos nutrientes en los tejidos de la parte aérea de las tres especies tal como se describe. El nitrógeno total se midió por el método Kjeldahl (Nelson y Sommers, 1980); la cantidad de proteína cruda se calculó multiplicando el porcentaje de N por 6.25; se utilizó el método SAAF (ISO6869:2000) para evaluar el contenido de calcio de las plantas (Ca), y la concentración de fósforo de las plantas (P) se evaluó por medio de un método espectrofotométrico (ISO 6491:1998). En la primera fecha de cosecha, se determinó el contenido de nitrato (NO_3^-) en 20 g de hojas frescas cortadas en tiras finas y trituradas hasta extraer el jugo, el cual se analizó después con el medidor de nitratos NO_3^- LAQUA twin (HORIBA; Irvine, CA, USA).

Para cada cultivo, la superficie neta de cada parcela experimental se cosechó a mano por separado, se descartaron las hileras de los bordes. El contenido de materia seca (MS) se evaluó por medio del secado en horno de una cantidad conocida de muestras frescas representativas de cada parcela justo después de la cosecha, a 70 ± 2 °C durante 48 h. El rendimiento de materia seca (RMS) se calculó entonces multiplicando el contenido de MS por el rendimiento de forraje verde. En el momento de la cosecha, se recogieron muestras de plantas de cada parcela, se secaron en el horno, se mezclaron, se pulverizaron y se guardaron para posteriores análisis de las variables de calidad. La fibra cruda (FC) se determinó mediante los procedimientos FIBERSAC indicados por el método ANKOM (procedimientos AOCS Ba 6a-05). El contenido de cenizas ("cenizas") se determinó tras quemar las muestras en un horno de mufla a 550 °C durante 10 h.

Análisis estadísticos

Se comprobó la normalidad de todos los datos registrados por medio de la prueba de Kolmogorov-Smirnov. A continuación, se realizó un análisis de la varianza con el programa IBM SPSS Advanced Statistics, versión 22. La aplicación del inóculo se consideró un factor fijo. Se utilizó la prueba de Tukey a $p < 0.05$ para la comparación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La elección de la combinación adecuada entre las especies forrajeras es de suma importancia para mejorar tanto el rendimiento como la calidad del forraje de una mezcla de cultivos (Iannucci *et al.*, 2006). La introducción de biofertilizantes benéficos se reconoce como una poderosa forma natural de proporcionar nutrientes a las plantas y preservar el ambiente de forma natural y respetuosa (Yadav y Smritikana, 2019). En consecuencia, esta investigación pretende contribuir a nuestro conocimiento sobre los efectos positivos de la combinación de fuentes de inoculación y cultivos intercalados, así como evaluar en qué medida esta estrategia podría mejorar las características morfológicas y fisiológicas, el rendimiento y la calidad de una mezcla multi específica de cultivos.

Variables agromorfológicas de la veza y los cereales en condiciones controladas

El análisis de varianza mostró que las variables agromorfológicas de la veza y los cereales (PAF, PFR, LR, NodN, NodW) dependían significativamente ($p < 0.001$) de los tratamientos de inoculación, excepto la veza, en la cual el AFW no fue afectado (Cuadro 3). En general, tanto para la veza como para los cereales, la comparación de medias mostró que los mayores AFW y RFW se obtuvieron en las plantas tratadas con B y la combinación B+M. Nuestros resultados coinciden plenamente con los reportados por Ertekin y Cakmakçi (2020). En comparación con el control, las plantas de veza tratadas con B proporcionaron un 15 y un 30 % más de AFW y RFW, respectivamente.

Cuadro 3. Efecto de tratamientos de inoculación sobre las variables agromorfológicas de las plantas de veza y cereales.

Tratamientos	PAF (g)		PFR (g)		LR (cm)		NodN	NodW
	Especies de cultivo intercalado							
	Veza	Cereales	Veza	Cereales	Veza	Cereales	Veza	Veza
C	0.21a	0.11c	0.20c	0.12d	11.00d	17.67b	12.67c	10.53a
M	0.19a	0.18b	0.27ab	0.18c	17.00c	23.33a	18.17a	7.87c
B	0.23a	0.16b	0.28a	0.27b	23.00a	25.00a	15.00b	8.77b
M+B	0.18a	0.22a	0.25b	0.45a	20.00b	23.00a	14.67b	9.07b
ANVA	ns	***	***	***	***	***	***	***

PAF: peso fresco de la parte aérea; PFR: peso fresco de raíz; LR: longitud de raíz; NodN: número de nódulos; y NodW: peso de nódulos. Significativo en ** $p < 0.01$ y *** $p < 0.001$; ns: no significativo. Las medias seguidas de letras diferentes muestran diferencia estadística (Tukey, $p < 0.05$).

Respecto a los cereales, los tratamientos B+M mejoraron el AFW y el RFW en un 50 y un 30 % (Cuadro 3). Las observaciones descritas anteriormente coinciden con las comunicadas por Xin *et al.* (2014) quienes demostraron que una combinación óptima de bacterias y micorrizas es capaz de mejorar el peso de la biomasa seca en diferentes especies de plantas. Además, la mayor LR se obtuvo para todas las especies tratadas con bacterias, y alcanzó 23 cm y 25 cm en la veza y los cereales, respectivamente. Los valores más bajos se registraron en el tratamiento de control, con una media de 11 cm y 17.67 cm en plantas de veza y cereal, respectivamente (Cuadro 3). Estos resultados podrían estar relacionados con el carácter autóctono de las bacterias utilizadas, que las hace más adecuadas al ambiente. Además, las micorrizas tardarían más tiempo en crecer y colonizar su entorno, por tanto es probable que su efecto se retrase. En el caso de NodN, el valor más alto se obtuvo con el tratamiento M (un 30% mayor que el testigo). Sin embargo, el valor máximo de NodW se registró en las plantas no tratadas (10.53 mg).

El efecto benéfico de las bacterias en la nodulación se ha documentado con amplitud (Kidaj *et al.*, 2012). No obstante, la disminución de NodN obtenida con la inoculación doble por bacterias rizobianas y AMF pudo atribuirse a la competencia entre los diferentes AMF aplicados, y los ya presentes de forma natural en el suelo, lo cual afectaría al alcance final de la colonización de la planta.

Variables morfológicas en condiciones de campo

En campo, las diferencias entre tratamientos fueron más pronunciadas en la segunda cosecha (142 d después de la siembra), debido principalmente a la duración de adaptación de los biofertilizantes. En la mayoría de los casos, se observó variación significativa entre los tratamientos de inoculación para las variables morfológicas probadas (altura y razón hojas:tallo), en ambas fechas de cosecha y para especies individuales. Sin embargo, no se registraron diferencias significativas de altura entre las plantas tratadas 74 d después de la siembra (Figura 1). En la primera cosecha (74 d después de la siembra), entre los cuatro tratamientos, la razón hojas:tallo media se observó en las plantas sometidas a M+B, C y M+B para la veza, la avena y el triticale, respectivamente. En la segunda cosecha, la aplicación de la combinación M+B dio lugar a un 7 % de altura adicional en comparación con el control para la avena y la veza, respectivamente. Para el triticale, las plantas tratadas con B registraron las plantas más altas (Figura 1A). En la razón hojas:tallo, las aplicaciones de micorrizas y bacterias aumentaron los valores de la razón hojas:tallo para la avena y la veza un 38 y un 19 %, respectivamente, en comparación con los testigos correspondientes. En tanto que, para las plantas de triticale se obtuvieron diferencias muy ligeras tras las aplicaciones de inóculo (Figura 1B).

Cambios en las variables fisiológicas en condiciones de campo

Entre los diferentes tratamientos de inoculación, se registraron diferencias significativas en los valores SPAD y área foliar (LA) (Figura 2). En la primera cosecha, la aplicación del inóculo bacteriano mejoró los valores SPAD en un 11 % para los dos cultivos

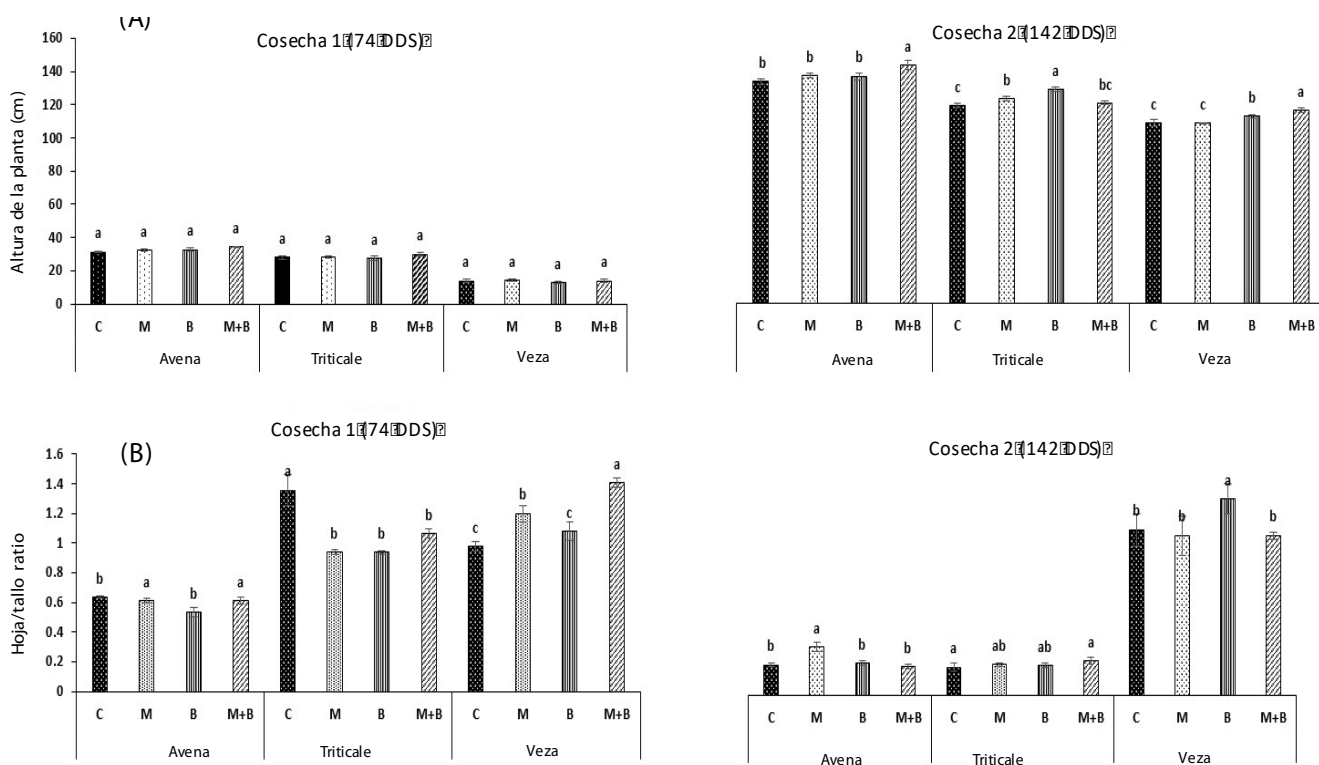


Figura 1. (A) altura de la planta y (B) razón hojas:tallo en dos fechas; cosecha 1 (74 d después de la siembra, dds) y cosecha 2 (142 dds), bajo cuatro tratamientos de inoculación en avena, triticale y veza. C: control; M: inóculo de micorrizas; B: inóculo bacteriano; M+B: inóculo dual de micorrizas y bacterias. Para cada cultivo, las medias seguidas de letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey, $p < 0.05$).

de avena y veza. En el caso del triticale, los valores SDAP mejoraron en las plantas tratadas con M+B. Sólo las plantas de triticale mostraron una variación sustancial durante la segunda cosecha, con una preponderancia de las plantas inoculadas con bacterias que mostraron valores un 16 % más altos que el testigo. (Figura 2A). En general, el área foliar varió significativamente de 206 a 536 cm² por planta. En particular, las plantas tratadas con M+B mostraron una mejora en LA comparadas con el control, un 29, 20 y 15 % para los cultivos de avena, veza y triticale, respectivamente. En la segunda cosecha, la prevalencia de las plantas de los tratamientos combinados M+B sólo se detectó para la veza y el triticale. Por el contrario, los valores de LA para la avena disminuyeron con las aplicaciones de inóculo (Figura 2B).

Cambios en los valores nutritivos en condiciones de campo

La absorción de N, P y Ca por parte de los cultivos se vio significativamente afectada ($p < 0.01$) por las inoculaciones. En concreto, todos ellos mejoraron significativamente su estado nutricional en comparación con los testigos correspondientes (Figura 3). En

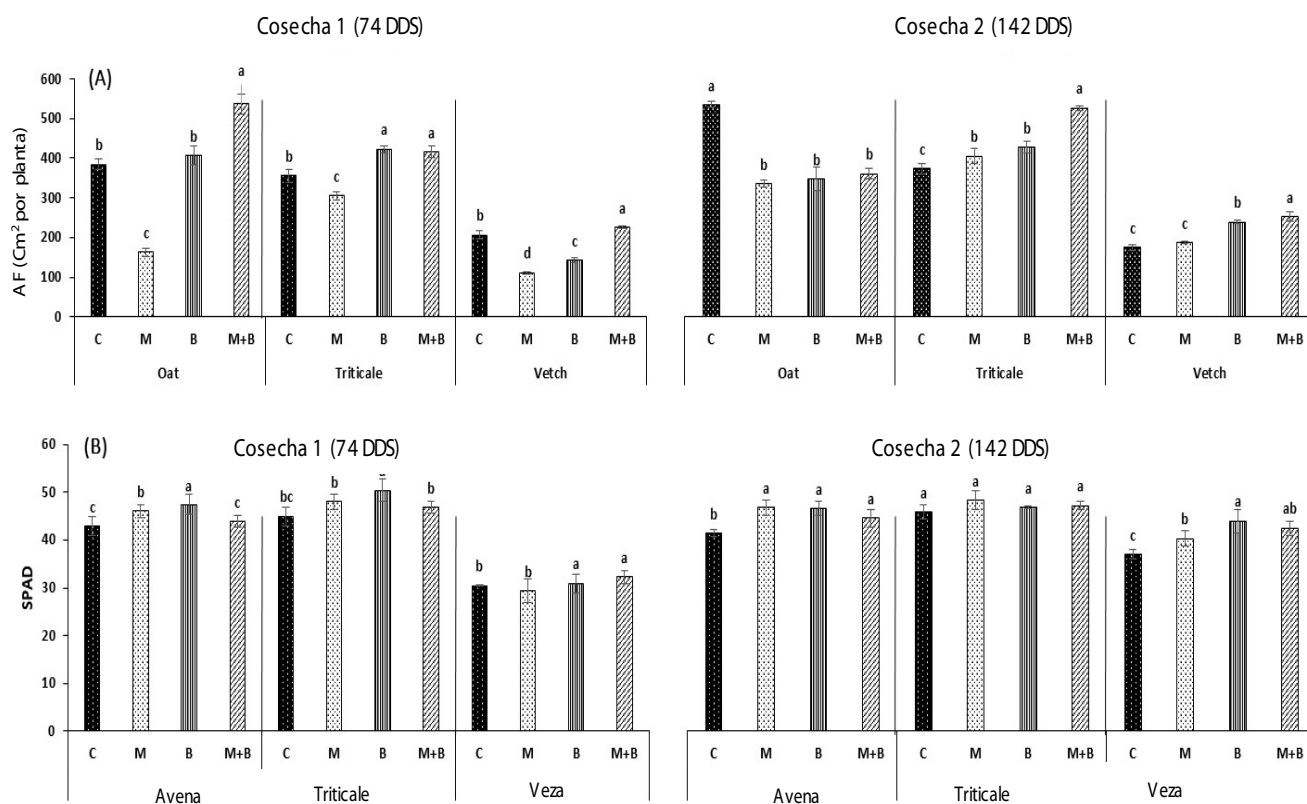


Figura 2. (A) área foliar y (B) unidades SPAD en avena, triticale y veza bajo cuatro tratamientos de inoculación. C: control; M: inóculo de micorrizas; B: inóculo bacteriano; M+B: inóculo dual de micorrizas y bacterias. Para cada cultivo, las medias seguidas de letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey, $p < 0.05$).

cuanto a la PC, se registraron los valores máximos para las plantas tratadas con M+B (16.9 %) y B (16.83 %) en la primera y segunda cosecha, respectivamente. Los valores más bajos se encontraron en las plantas no tratadas y en las inoculadas con micorrizas (Figura 3A). En la primera cosecha, las plantas inoculadas con micorrizas superaron a las otras plantas tratadas en cuanto a la absorción de fósforo. Esto puede atribuirse a la capacidad de los AMF para mejorar la eficiencia de la absorción de P del suelo, que de otro modo es difícil de absorber por las plantas en suelos alcalinos (Hou *et al.*, 2012). En la segunda cosecha, la mayor captación de P se registró en las plantas inoculadas con bacterias (Figura 3B). Las diferencias entre las tres especies podrían deberse a cambios en la morfología de las raíces, que está demostrado que alteran la colonización micorrícica de la rizosfera.

Respecto a la captación de Ca, se registró una mejora del 23 % con los tres tratamientos de inóculo a 42 dds. No obstante, a los 142 dds, no hubo un efecto significativo de la inoculación sobre la captación de Ca (Figura 3C). Además, la ganancia en el contenido de nitrato (NO_3^-) en las hojas sólo fue notable en las plantas inoculadas con la combinación de bacterias y micorrizas, con valores 40.52, 53.11 y 54.54 % más altos en

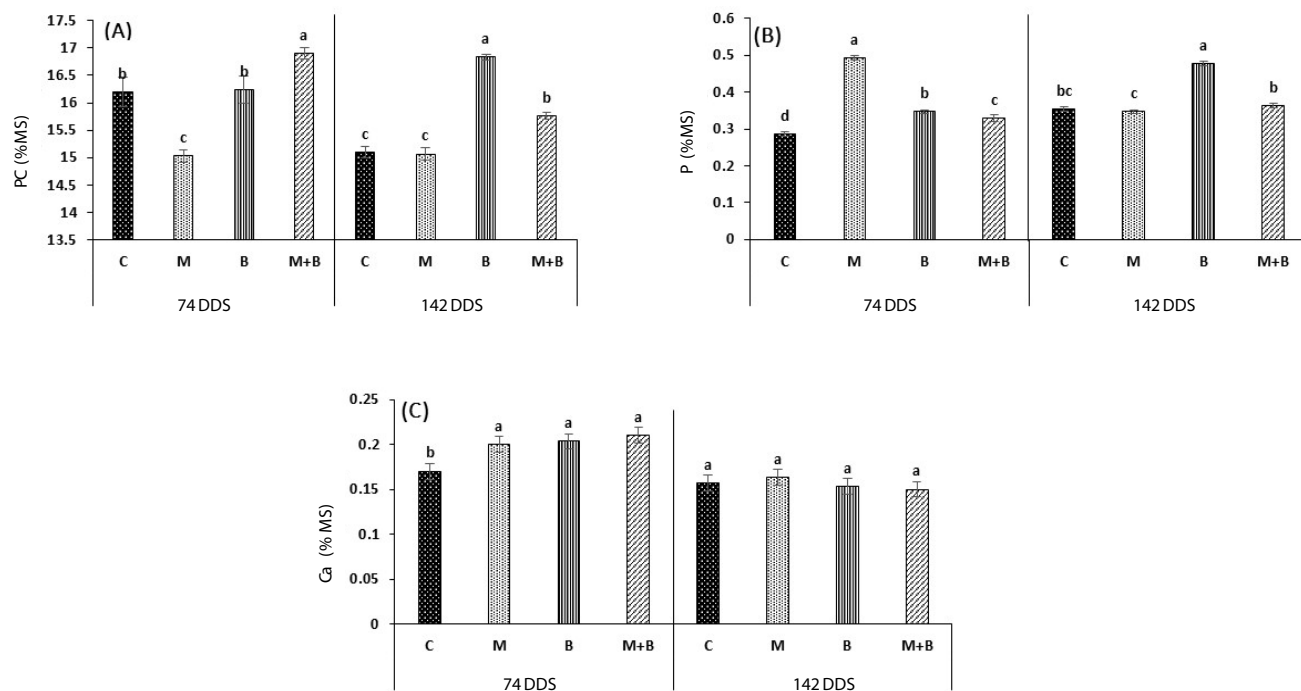


Figura 3. Contenido en materia seca de proteína cruda (A), fósforo (B) y calcio (C) en los tejidos foliares de plantas de avena, triticale y veza bajo cuatro tratamientos de inoculación. PC: proteína cruda; C: control; M: inóculo de micorrizas; B: inóculo bacteriano; M+B: inóculo dual de micorrizas y bacterias. Para cada cultivo, las medias seguidas de letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey, $p < 0.05$).

relación con las plantas testigo para avena, triticale y veza, respectivamente (Cuadro 4). Se puede afirmar que la inoculación de rizobacterias condujo a una mejora de la biomasa microbiana debido a la relación de mutuo beneficio que mejoró la absorción

Cuadro 4. Contenido de nitrato (NO_3) en los tejidos foliares de plantas de avena, triticale y veza bajo cuatro tratamientos de inoculación. C: control; M: inóculo de micorrizas; B: inóculo bacteriano; M+B: inóculo dual de micorrizas y bacteria

Especie Tratamientos	Avena	Triticale	Veza
C	451.67d±17.5	578.33c±16.0	583.33d±25.1
M	630.00b±10.	573.33c±15.0	1213.33b±104.0
B	567.00c±7.0	703.33b±15.0	1050.00c±50.0
M+B	714.00a±15.0	1233.33a±58.0	1283.33a±28.0
ANVA	***	***	***

Análisis de varianza; significativo en *** $p < 0.001$. Para cada cultivo, las medias seguidas de letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey, $p < 0.05$).

de nutrientes del suelo (Zaidi *et al.*, 2017). Mpairwe *et al.* (2002) informaron resultados similares, encontraron que el intercalado de cereales y leguminosas forrajeras aumentaba el contenido de proteína vegetal. Debido principalmente a la red de hifas y a los nódulos, los cuales facilitan el movimiento de nutrientes y carbohidratos de la leguminosa a los cultivos de cereales (Megueni *et al.*, 2011). Rodríguez *et al.* (2020) demostraron que un buen efecto estructurador del sistema radical de las leguminosas aumentó la biodiversidad del suelo y mejoró la disponibilidad de nutrientes, a partir de compuestos que de otro modo serían inaccesibles para los sistemas radicales de los cereales.

Calidad y rendimiento del forraje

El análisis de la varianza mostró una variación significativa de los indicadores de calidad con los tratamientos de inoculación. En general, se obtuvo una ligera diferencia para la proteína cruda en las dos fechas de cosecha. En particular, el PC más alto se encontró en 142 dds para las plantas testigo y tratadas (Figura 4A).

Para la propiedad cenizas, los valores más altos se registraron en la primera cosecha (74 dds). En comparación con las plantas testigo, todos los tratamientos aumentaron los valores de cenizas, con un máximo para las plantas micorrizadas (7.7 %). A los 142 dds, las plantas inoculadas con B y B+M produjeron más cenizas que otras plantas tratadas o no tratadas (Figura 4B). Estos resultados son similares a los de Sibi *et al.* (2015) y Heydarzadeh *et al.* (2022), quienes demostraron el efecto positivo de estos inóculos sobre el contenido de cenizas para el maíz intercalado con ejotes. También se ha documentado que la inoculación con micorrizas aumentó el contenido de cenizas, debido a su papel benéfico en la promoción de la absorción de nutrientes, por medio del ajuste del pH o la liberación de enzimas (Puzynska *et al.*, 2021).

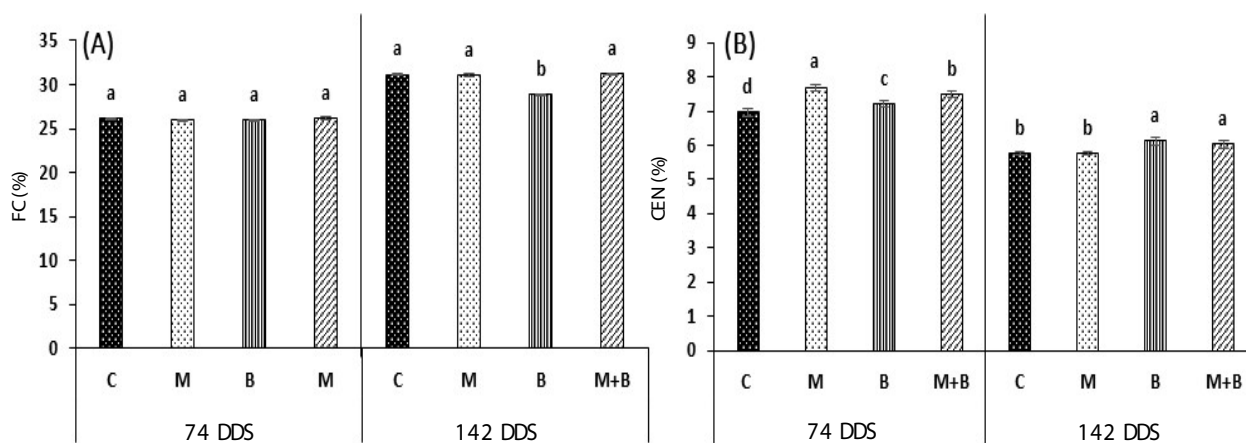


Figura 4. Variación de la fibra cruda (A) y Ceniza (B) bajo cuatro tratamientos de inoculación para veza, avena y triticale. C: control; M: inóculo de micorrizas; B inóculo bacteriano; M+B: inóculo dual de micorrizas y bacterias.

Más aún, varias inoculaciones dieron lugar a un aumento considerable del rendimiento de MS. En promedio, en ambas fechas de cosecha, las plantas tratadas con M+B tuvieron los valores de rendimiento más altos, seguidas por las plantas tratadas con B (Figura 5). En particular, en comparación con el testigo, el inóculo dual M+B mejoró significativamente el rendimiento de MS en un 41.2 %, correspondiente a 2.1 y 1.67 Mg en 74 y 142 dds, respectivamente (Figura 5). El incremento del rendimiento de la materia seca de las plantas inoculadas se atribuye al efecto positivo de las PGPR y las micorrizas en el crecimiento de las raíces, lo cual ayuda a una mayor absorción de agua y nutrientes. Según Sahoo *et al.* (2013), estas asociaciones microbianas incluyen muchos microorganismos naturales que mejoran las propiedades fisicoquímicas del suelo, el rendimiento de los cultivos, la salud del suelo y el crecimiento de las plantas.

CONCLUSIONES

El uso de cultivos intercalados de veza, avena y triticale, combinados con micorrizas y biofertilizantes bacterianos, constituye una forma eficaz de aumentar la eficiencia del uso de la tierra para los pequeños agricultores. Y lo que es más interesante, este estudio destacó cómo el uso de una combinación de biofertilizantes podría ayudar a los agricultores a conseguir mayores rendimientos de forraje en términos de cantidad y calidad. Se requiere investigación subsecuente acerca de los mecanismos exactos de estos biofertilizantes, así como sus interacciones con especies de cultivo específicas.

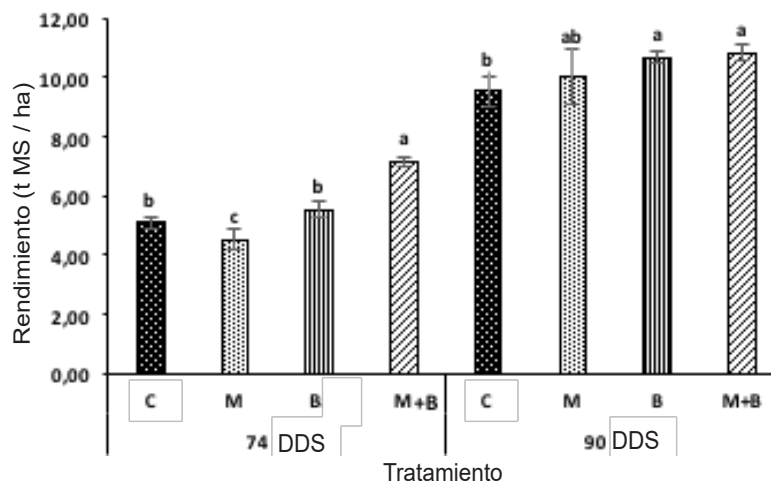


Figura 5. Rendimiento de materia seca afectado por diferentes tratamientos de inoculación; C: control, M: inóculo de micorrizas, B: inóculo bacteriano y M+B: la doble inoculación de micorrizas e inóculo bacteriano) en las dos fechas de cosecha (74 y 142 d después de la siembra).

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es acorde con las actividades de las asociaciones ATAE y AAG, y tuvo el apoyo financiero de estas asociaciones y del Ministerio de Agricultura de Túnez.

REFERENCIAS

- Abdelkrim S, Harzalli Jebara S, Saadani O, Jebara M. 2018. Potentialities of efficient and resistant Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Pb uptake and defensive system stimulation of *Lathyrus sativus* under lead stress. *Plant Biology* 20 (5): 857–869. <https://doi.org/10.1111/plb.12863>
- Agegnehu G, Ghizaw A, Sinebo W. 2008. Yield potential and land-use efficiency of wheat and faba bean mixed intercropping. *Agronomy for Sustainable Development* 28: 257–263. <https://doi.org/10.1051/agro:2008012>
- Anil L, Park RHP, Miller FA. 1998. Temperate intercropping of cereals for forage A review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass Forage Science* 53 (4): 301–317. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.1998.00144.x>
- Beya S. 2018. Caractérisation d'une association fourragère tri-spécifique Triticale-avoine noire-vesce velue. *Projet de fin d'études. ESA-Mateur: Bizerte, Tunisie.* 77 p.
- Compant S, Duffy B, Nowak J, Clément C, Barka EA. 2005. Use of plant growth promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action and future prospects. *Applied and Environmental Microbiology* 71 (9): 4951–4959. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005>
- Dar SA, Lone FA, Dar SA, Bhat RA, Bashir I, Mir SA, Dar ZA. 2020. Biofilm: an innovative modern technology for aquatic pollution remediation. *In: Bioremediation and Biotechnology Vol 2.* Bhat R, Hakeem K, Dervash M. (eds.); Springer: Cham. pp: 207–219. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40333-1_12
- Ertekin I, Çakmakçı S. 2020. Effect of different rates of bacteria (*Rhizobium leguminosarum*) inoculated in seed on yield and some quality parameters of common vetch (*Vicia sativa* L.). *Journal of Agriculture and Nature* 23 (2): 343–349. <https://dx.doi.org/10.18016/ksutarimdogavi.562310>
- Ferchichi N, Toukabri, W, Vrhovsek U, Angeli A, Masuero D, Mhamdi R, Trabelsi D. 2019. Inoculation of *Lupinus albus* with the nodules-endophyte *Paenibacillus glycanilyticus* LJ121 improves grain nutritional quality. *Archives of Microbiology* 202: 283–291. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01745-6>
- Glick BR. 2012. Plant growth promoting bacteria: mechanisms and applications. *Hindawi Scientifica* 2012: 1–15 p. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Graham PH, Vance, CP. 2003. Legume importance and constraints to greater use. *Plant Physiology* 131 (3): 872–877. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.017004>
- Hammami S, Le Roux C, Dhane-Fitouri S, De Lajudie P, Duponnois R, Ben Jeddi F. 2019. Genetic diversity of rhizobia associated with root nodules of white lupin (*Lupinus albus* L.) in Tunisian calcareous soils. *Systematic and Applied Microbiology* 42 (4): 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2019.04.002>
- Hashemi M, Farsad A, Sadeghpour A, Weis SA, Herbert SJ. 2013. Cover crop seeding date influence on fall nitrogen recovery. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176 (1): 69–75. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200062>
- Heydarzadeh S, Jalilian J, Pirzad A, Jamei R, Petrusa E. 2022. Fodder value and physiological aspects of rainfed smooth vetch affected by biofertilizers and supplementary irrigation in an agri-silviculture system. *Agroforestry Systems* 96: 221–232. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00695-7>
- Iannucci A, Carroni AM, Martiniello P. 2006. Performances of legume-grass mixtures under different cutting managements in Mediterranean environments. *Italian Journal of Agronomy* 1 (3): 359–368. <https://doi.org/10.4081/ija.2006.359>
- Kamalongo DM, Cannon ND. 2020. Advantages of bicropping field beans (*Vicia faba*) and wheat (*Triticum aestivum*) on cereal forage yield and quality. *Biological Agriculture and Horticulture* 36 (4): 213–229. <https://doi.org/10.1080/01448765.2020.1788991>

- Kang Y, Kim M, Shim C, Bae S, Jang S. 2021. Potential of Algae-Bacteria Synergistic Effects on Vegetable Production. *Frontiers in Plant Science* 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.656662>
- Kidaj D, Wielbo J, Skorupska A. 2012. Nod factors stimulate seed germination and promote growth and nodulation of pea and vetch under competitive conditions. *Microbiological Research* 167 (3): 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2011.06.001>
- Lancashire P, Bleiholder H, Vandenboom T, Langeluddeke P, Stauss R, Weber E, Witzemberger A. 1991. A uniform decimal code for growth-stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology* 119 (3): 561–601. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x>
- Meier U, Bleiholder H, Buhr L, Feller C, Hacks H, Hess M, Lancashire PD, Schnock U, Stauss R, Boom TVD. 2009. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants-history and publications. *Journal of Cultivated Plants* 61 (2): 41–52.
- Mohammad A, Mitra B, Khan AG. 2004. Effects of sheared-root inoculum of *Glomus intraradices* on wheat grown at different phosphorous levels in field. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103 (1): 245–249. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.017>
- Papastylianou I. 2004. Effect of rotation system and N fertilizer on barley and common vetch grown in various crop combinations and cycle lengths. *The Journal of Agricultural Science* 142 (1): 41–48. <https://doi.org/10.1017/S0021859604004009>
- Pertot I, Alabouvette C, Hinarejos Esteve E, Franca S. 2016. Focus group soil-borne diseases mini-paper. The use of microbial biocontrol agents against soil-borne diseases. 11 p.
- Puzynska K, Synowiec A, Puzyński S, Bocianowski J, Klima K, Lepiarczyk A. 2021. The performance of oat-vetch mixtures in organic and conventional farming systems. *Agriculture* 11 (4): 332. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040332>
- Qin AZ, Huang GB, Chai Q, Yu AZ, Huang P. 2013. Grain yield and soil respiratory response to intercropping systems on arid land. *Field Crops Research* 144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.12.005>
- Rosenblueth M, Ormeño-Orrillo E, López-López A, Rogel MA, Reyes-Hernández BJ, Martínez-Romero C, Redd PM, Martínez-Romero E. 2018. Nitrogen Fixation in cereals. *Frontiers in Microbiology* 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01794>
- Saharan BS, Nehra V. 2011. Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Science and Medical Research, LSMR-21*: 1–30.
- Sahoo RK, Ansari MW, Dangar TK, Mohanty S, Tuteja, N. 2013. Phenotypic and molecular characterization of efficient nitrogen fixing *Azotobacter* strains of the rice elds. *Protoplasma* 251: 511–523. <https://doi.org/10.1007/s00709-013-0547-2>
- Sibi M, Faryabi E, Marzban Z J. 2015. Assessment of forage corn quality intercropping with green beans under influence of *Rhizobium* bacteria and arbuscular mycorrhizal fungus. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences* 6 (5): 418–424.
- Stomph T, Dordas C, Baranger A, de Rijk J, Dong B, Evers J, Gu C, Li L, Simon J, Jensen ES, Wang Q, Wang Y, Wang Z, Xu H, Zhang C, Zhang L, Zhang WP, Bedoussac L, van der Werf W. 2020. Chapter one - Designing intercrops for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles? *Advances in Agronomy, Academic Press* 160 (1): 1–50. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.10.002>
- Thomas L, Singh I. 2019. Microbial Biofertilizers: Types and Applications. *In: Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment (Soil Biology Vol 55)*. Giri B, Prasad R, Wu QS, Varma A. (eds.); Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_1
- Yadav K, Smritikana S. 2019. Impact on soil fertility and crop productivity under sustainable agriculture. *Environment and Ecology* 37 (1): 89–93.
- Youseif SH. 2018. Genetic diversity of plant growth promoting rhizobacteria and their effects on the growth of maize plants under greenhouse conditions. *Annals of Agricultural Sciences* 63 (1): 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2018.04.002>
- Zaidi A, Khan M, Rizvi A. 2017. Role of Phosphate Solubilizing Bacteria in Legume Improvement. *In: Microbes for Legume Improvement*. Zaidi A, Khan M, Musarrat J. (eds.); Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59174-2_8

EVALUATION OF QUINOA GERMPLASM IN ENVIRONMENTS OF THE CENTRAL HIGH-VALLEY LANDS OF MEXICO

Miriam Gabriela Valverde-Ramos¹, Eduardo Espitia-Rangel²,
Salvador Miranda-Colín¹, Ignacio Benítez-Riquelme^{1*}

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

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Los Reyes- Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, State of Mexico, Mexico, C. P. 56250.

* Author for correspondence: riquelme@colpos.mx

ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a crop that grows under conditions of environmental stress, has high nutritional value, and agronomic potential. It is grown and marketed on a small scale in Mexico. However, there are no varieties or technology for its production. The objective of this research was to determine the performance of quinoa germplasm in the Central high-valley lands of Mexico. Sixteen genotypes of different origins and characteristics were evaluated in three environments in the localities of Nanacamilpa, Tlaxcala; and Santa Lucía de Prías, Texcoco, State of Mexico. Statistical differences ($p \leq 0.05$) were found for genotypes. Late genotypes Suyana, Suma, Pata de Venado, Blanca Ayacucho, and Huauzontle showed higher grain yield (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7, and 2967.2 kg ha⁻¹, respectively). Among the intermediate genotypes, Tokio rosa and Pasankalla reventona were the better with 2858.4 and 2118.4 kg ha⁻¹, respectively. Whereas among the early genotypes, Tarpuna had the highest grain yield (3005.8 kg ha⁻¹). Regarding seed diameter, only Huauzontle and Quinoa negra had a seed size equal to or smaller than 1.8 mm; the rest of the genotypes can be marketed as grains because of their seed size. Of the environments evaluated, the least favourable was Nanacamilpa 2019, while Santa Lucía de Prías 2019 was the most favourable environment. Overall, the performance of the evaluated genotypes was as expected, as they mostly come from the Inter-Andean Valleys region, which are very similar in altitude and temperature to the Central high-valley lands of Mexico.

Keywords: *Chenopodium quinoa*, adaptation, yields, grain size, varieties.

INTRODUCTION

Climate change affects agricultural production conditions (Hasegawa, 2013). The impact on agriculture and the implications for food security are alarming. Farmers, ranchers, fishermen, and community foresters depend on activities inextricably linked to climate. These groups are also the most vulnerable to climate change (FAO, 2016), as human health hazards are on the rise, particularly in lower-income populations, as a result of extreme temperatures and declining water, air and food quality (WHO, 2017). Droughts and soil salinity are major problems (Zeglin *et al.*, 2013). Coupled with the

Citation: Valverde-Ramos MG, Espitia-Rangel E, Miranda-Colín S, Benítez-Riquelme I. 2022. Evaluation of quinoa germplasm in environments of the Central High-Valley Lands of Mexico. *Agrociencia*. 56(7): 1254-1277. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2572>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: May 02, 2022.
Approved: September 16, 2022.
Published in Agrociencia:
November 03, 2022.

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



continuous increase in population, farmers need to explore new alternatives to adapt to changes.

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is one of the oldest crops in the Andean region of South America, domesticated more than 7000 years ago in its centre of origin (Peru and Bolivia). It is an annual, dicotyledonous species of the Amaranthaceae family (Bazile *et al.*, 2016). Quinoa has a high genetic variability. It is grown under severe drought conditions, reflecting its adaptability to agroecological stress conditions, such as marginal soils, low temperatures and fertility, drought, salinity and environments rich in ultraviolet radiation (Tapia, 1997; Bosque *et al.*, 2000).

Approximately 40 commercial genotypes are known in Andean countries, which have wide variability in plant, inflorescence and seed colour. They are characterized by a branched growth habit up to the second third, with about 1 to 2 m height. The growing season and physiological maturity of Quinoa take 4 to 6 months, and it is considered a preponderantly self-pollinated species (Mujica *et al.*, 2001; Zurita-Silva *et al.*, 2014; Curti *et al.*, 2016). This allows varieties to be selected, adapted and cultivated for a wide range of environmental conditions (Jacobsen, 2003).

Quinoa is an expanding crop used as human food and animal feedstock due to its high nutritional value. It is high in vitamins, proteins and minerals, and is reported to provide all essential amino acids for humans (FAO, 2011; Rojas *et al.*, 2015). It is also attributed medicinal properties, such as healing, anti-inflammatory, analgesic and disinfectant (Valenzuela *et al.*, 2015; Nowak *et al.*, 2016). Another characteristic of quinoa is the presence of saponins found in the seed husk and the absence of gluten (Jacobsen *et al.*, 2005).

In regard to yield, Gómez and Aguilar (2016) reported that in plantations in their centre of origin, yields range from 1200 to 3500 kg ha⁻¹, while DGPA (2021) notified yields of 740 to 3632 kg ha⁻¹. Regarding the potential in countries where it is not traditionally planted, yields from 200 to 2050 kg ha⁻¹ are reported (Bazile *et al.*, 2016), while Chura *et al.* (2019) recorded 2836.55 to 5099.18 kg ha⁻¹. The crop has been introduced in regions of North America, Europe, China, and the Middle East (Jacobsen, 2017; Katwal and Bazile, 2020). The commercialization and use of quinoa depend on seed size. Seed diameters from 1.2 to 2.5 mm and thousand-kernel weight from 2.09 to 3.8 g are reported (Zurita-Silva *et al.*, 2014; Chura *et al.*, 2019).

In Mexico, quinoa is an alternative for the production of high-quality foods that contribute to solve nutritional problems. It is an alternative for late plantings and crop rotation. However, it is grown on a small scale and there are no varieties or technology for its production (Espitia *et al.*, 2019). The objective of this study was to determine the agronomic performance of 16 quinoa genotypes to evaluate their adaptability in the Central high-valley lands of Mexico.

MATERIALS AND METHODS

Fifteen recently introduced genotypes from Peru, Ecuador, and Bolivia, and one Huauzontle (also known as Mexican quinoa) were evaluated. These materials were

selected based on a characterization carried out at INIFAP - CEVAMEX, where materials adapted to the conditions of the Central high-valley lands of Mexico were chosen (Table 1).

Location and climate conditions

Genotypes were evaluated at two locations: Santa Lucía de Prías, Texcoco, State of Mexico (19° 26' 42'' N, 98° 53' 15'' W), in 2019; and Nanacamilpa, Tlaxcala, in 2018 and 2019 (19° 29' 22'' N, 98° 33' 46'' W). Those locations have environmental conditions (Table 2) similar to the inter-Andean valleys where is the origin of most of the genotypes in the trial. Sowing dates were in Nanacamilpa, July 25 (2018) and June 18 (2019); in Santa Lucía de Prías, June 28 (2019).

Table 1. *Chenopodium* genotypes used in the study.

No.	Name	Fruit colour	Quinoa type	Ecological region of origin
1	Huauzontle	Yellow	Bitter	High valleys
2	Suma	Green	Sweet	Highlands
3	Tokio rosa	Green	Bitter	Highlands
4	Blanca Ayacucho	Green	White	Inter-Andean valleys
5	Choclo	Green	Sweet	High-Andean
6	Tarpuna	Green	Bitter	valleys Inter-Andean
7	Pata de Venado	Green	Sweet	valleys
8	Suyana	Yellow	Bitter	Inter-Andean valleys
9	Misa amarilla	Yellow	Bitter	Inter-Andean valleys
10	Marangani	Yellow	Bitter	Inter-Andean valleys
11	Roja ku	Red	Bitter	Highlands
12	Rojita	Red	White	Highlands
13	Pasankalla lila	Gray	Sweet	Highlands
V14	Quinua negra	Gray	Sweet	Highlands
15	Pasankalla reventona	Gray	Sweet	Highlands
16	Pasankalla plomo	Gray	Sweet	Highlands

Table 2. Soil type and precipitation in the three evaluation environments. P-V 2018-2019.

Location	Altitude (m)	Soil type	Precipitation in the cycle (mm)
Nanacamilpa, Tlaxcala. 2018	2829	Sandy-loam	299.6
Nanacamilpa, Tlaxcala. 2019	2829	Sandy-loam	364.05
Santa Lucía de Prías, State of Mexico. 2019	2250	Sandy-loam	263.6

Experimental design and crop management

In each experiment the genotypes were distributed in a randomized complete blocks design with six replicates; the experimental plot consisted of three furrows 5 m long and 0.8 m apart. The crop was grown under rainfed conditions, without fertilization. In all experiments, two manual weeding operations were carried out 25 and 45 days after sowing (das).

Variables studied

The following variables were recorded: days to panicle emergence (d), days to maturity (d), and grain filling period (d). The first two were recorded when 50 % of the plants in each plot were at the inflorescence bud or the physiological maturity of the grain, respectively. Stem diameter (cm) of 10 representative plants per plot was measured at flowering, and plant height (cm) at grain maturity was recorded. The biological yield was taken from representative samples of aboveground biomass (500 g), which were dried at 60 °C until a constant weight was obtained and extrapolated to useful areas of 3 m². Seed diameter (cm) was obtained from 10 groups of 10 seeds per plot, with a digital Vernier ruler (Stainless Hardened). The hectolitre weight (kg hL⁻¹) was determined from the weight of a known volume of seed and extrapolated to 100 L weight. The thousand-kernel weight (g) was determined based on the weight of five groups of 100 grains per plot, and grain yield (kg ha⁻¹) was measured in 3 m of the central furrow and extrapolated per hectare. The harvest index was estimated by the ratio of economic yield to biological yield.

Data analysis

Data were analysed using GLM of SAS® (SAS 9.4 2012). An analysis of variance was performed for environments and genotypes. Tukey tests ($p \leq 0.05$) were performed for comparison of means among environments and genotypes.

RESULTS AND DISCUSSION

For both environments and genotypes, significant differences were found at $p \leq 0.01$ for all variables (Table 3). For the genotype*environment interaction, significance was found at $p \leq 0.01$ for most variables, except stem diameter, seed diameter, and harvest index. This suggests a differential response of the genotypes and environments evaluated. Thiam *et al.* (2021) reported significant difference for stem diameter, contrary to what was found in this study. Tan and Temel (2018) found significant differences for environment, genotype and genotype-environment interaction at $p \leq 0.01$ in yield, thousand-kernel weight, days to maturity, and plant height.

In the comparison of means by environment (Table 4), for phenological variables, the Nanacamilpa 2019 environment obtained higher panicle emergence and days to maturity (d), while Santa Lucía de Prías recorded higher grain filling period (d). On the other hand, Nanacamilpa 2018 presented lower values for these three variables. In Peru, quinoa matures in more than 190 d, with a longer grain filling period (Gómez and Aguilar, 2016), due to its growth at 3900 m; while in Mexico the planting conditions

Table 3. Mean squares for the variables studied of 16 quinoa genotypes, in three rainfed environments in the Central high-valley lands of Mexico. P-V 2018-2019.

Source gl.	Environment 2	REP(AMB) 15	Genotypes 15	GEN*AMB 30	Error 225
Emergence of panicle (d)	7821.21**	10.63	980.82**	24.31**	4.66
Days to maturity (d)	18871.34**	9.31	1541.75**	113.49**	3.66
Grain filling (d)	4764.83**	8.77	1207.45**	103.81**	11.10
Stem diameter (cm)	674.05**	4.82	14.84**	2.98ns	2.17
Plant height (cm)	91604.67**	460.42	8238.28**	420.00**	147.42
Seed diameter (mm)	0.985**	0.026	0.318**	0.028ns	0.035
Hectolitre weight (kg hL ⁻¹)	158.68**	13.10	51.33**	8.90**	2.94
Harvest index	1.225**	0.0332	0.041ns	0.030ns	0.035
Thousand-kernel weight (g)	6.16**	0.06	2.46**	0.16**	0.05
Grain yield (kg ha ⁻¹)	64686655**	1180719	8253981**	1231658**	389088

d: days. Different at ** $p \leq 0.01$ and * $p \leq 0.05$; ns, not different.

Table 4. Comparison of means of 10 variables evaluated in three rainfed environments in the Central high-valley lands of Mexico. P-V 2018-2019.

Variable /Environment	Nanacamilpa 2018	Nanacamilpa 2019	Santa Lucía de Prías 2019
Emergence of panicle (d)	44.11c	61.50a	48.90b
Days to maturity (d)	120.08c	147.39a	139.23b
Grain filling (d)	65.41c	73.98b	79.37a
Stem diameter (cm)	12.29b	9.11c	14.38a
Plant height (cm)	148.55b	120.00c	181.73a
Seed diameter (mm)	2.16a	2.03b	1.95c
Hectolitre weight (kg hL ⁻¹)	66.31c	68.70bc	68.34a
Harvest index	0.376a	0.434a	0.216b
Thousand-kernel weight (g)	3.08a	2.78b	2.57c
Grain yield (kg ha ⁻¹)	2743.4b	1734.5c	3360.7a

d: days. Means per column with different letters showed statistical difference ($p \leq 0.05$).

were at 2250 and 2829 m. Präger *et al.* (2018) mentioned that the growth period varies between 122 and 154 d, which agrees with what is found in this study.

The variables size, plant height and stem diameter at maturity were higher in Santa Lucía de Prías, while Nanacamilpa 2019 exhibited the lowest values. Chura *et al.* (2019) reported stem diameter values from 9.70 to 14.49 mm, which is consistent with the results found in this study. Gonzalez *et al.* (2011) reported plant heights from 61.4 to 98.6 cm at maturity, different from what we reported in this study.

For seed variables, Nanacamilpa 2018 showed higher thousand-kernel weight and seed diameter, but lower hectolitre weight. On the other hand, Nanacamilpa 2019 and

Santa Lucía de Prías showed higher hectolitre weight. These results are consistent with those reported by Altuner *et al.* (2019). In the Santa Lucía de Prías environment, the low values of thousand-kernel weight and seed diameter correspond to those obtained by Chura *et al.* (2019). Nanacamilpa 2018 and 2019 had higher harvest index, followed by Santa Lucía de Prías, these values are higher than those reported by Tan and Temel (2017). Finally, the highest yield was obtained in Santa Lucía de Prías environment, which corresponds to that reported by Chura *et al.* (2019). On the contrary, the lowest yield was obtained in Nanacamilpa 2019, which corresponds to González *et al.* (2011) and Tan and Temel (2017).

In the comparison of means by genotype (Table 5), in the phenological variables, the genotypes Suma, Blanca Ayacucho, Suyana, Huauzontle, Pata de Venado, Rojita, and Roja ku had a later growth period of 140 to 149 d. The earliest materials were Tarpuna, Choclo, Maranganí, and Misa amarilla (116, 124, and 125 d, respectively). The remaining genotypes had an intermediate growth period.

The early genotypes showed the shortest grain filling period, from 61 to 64 d, except Huauzontle, which is a late genotype with a grain filling period of 60 d. Huauzontle

Table 5. Comparison of means of 16 quinoa genotypes evaluated in three rainfed environments in the Central high-valley lands of Mexico. P-V 2018-2019.

Variables/ Genotypes	EPA	MAD	LLG	DIT	ALM	DIS	PEH	IC	PMG	REN
Late										
Suma	62b	149a	73bcd	13.7a	206a	2.1ac	66.7cde	0.3d	2.7cd	3888.3a
Blanca Ayacucho	50def	146ab	83a	13.0abc	175b	2.0cd	67.5cde	0.3cd	2.8cd	2999.7acd
Suyana	57c	143abc	72cd	13.5ab	173b	2.1ac	67.4cde	0.3acd	2.9ac	4004.9a
Huauzontle	71a	142abcd	60e	12.0abcde	160bc	1.7e	71.8a	0.4ac	1.9g	2967.2acd
Pata de Venado	49efg	142abcd	81ab	11.0de	150cde	1.9cde	68.9c	0.3acd	2.5c	3091.1ac
Rojita	53cd	141bcd	76abc	11.1cde	149cdef	2.1ac	67.7cde	0.3c	2.6cd	1930.9d
Roja ku	46fgh	140bcd	83a	11.3cde	142cdef	2.0ac	67.8cd	0.4acd	2.7df	2498.2cd
Intermediate										
Tokio rosa	49efgh	139bcd	80ab	12.7abcd	160bc	2.2a	69.0c	0.3acd	2.9acd	2858.4cd
Pasankalla lila	48efgh	135cde	76abc	10.7e	140def	2.2ac	67.4cde	0.3acd	2.9a	1960.2d
Quinoa negra	45hil	135de	80abc	11.1de	131efg	1.8de	69.9a	0.4acd	2.3a	2087.6cd
Pasankalla plomo	46gh	130ef	74bc	11.6cde	131fg	2.1ac	66.5cde	0.4acd	3.3a	2084.9cd
Pasankalla reventona	46gh	129ef	73bc	11.7bcde	131efg	2.1ac	67.0cde	0.3acd	3.3a	2118.4cd
Early										
Tarpuna	53ced	125f	63e	12.1abcde	152cd	2.2a	68.3c	0.4a	3.0a	3005.8acd
Misa amarilla	50defg	125f	62e	12.0abcde	138def	2.2a	64.9e	0.3acd	3.0a	1965.8d
Maranganí	53de	124fg	61e	12.3abcde	149cdef	2.2a	68.5c	0.3acd	3.0acd	2381.9cd
Choclo	41i	116g	64de	11.2cde	117g	2.0acd	65.2de	0.4a	2.8cd	1964.7d

EPA: panicle emergence (days), MAD: days to maturity (days), LLG: grain filling (days), DIT: stem diameter (cm), ALM: plant height (cm), DIS: seed diameter (mm), PHE: hectolitre weight (kg hL⁻¹), IC: harvest index, PMG: thousand-kernel weight (g), and REN: grain yield (kg ha⁻¹). Means per column with different letters showed statistical difference ($p \leq 0.05$).

and Suma had longer panicle emergence times (71 and 62 d); the other late specimens showed 46 to 57 d. Choclo showed less days of emergence (41 d), while the remaining early genotypes were 50 to 53 d. The panicle emergence time for the intermediate genotypes was 45 to 49 d. Other studies conducted in Mexico evaluated 36 quinoa varieties that ranged from 148 to 203 d to maturity (Mujica *et al.*, 2001). In its centre of origin, quinoa has a growing period between 90 and 210 d (Zurita-Silva *et al.*, 2014; Gómez and Aguilar, 2016).

For size variables, stem diameter ranged from 11.2 to 12.3 mm for early genotypes, and from 11.3 to 13.7 mm for late genotypes. The values found in this study agree with those of Chura *et al.* (2019). Pata de Venado, Rojita and Roja ku were the late genotypes with lower height at maturity (142, 149, and 150 cm), followed by Huauzontle, Suyana and Blanca Ayacucho (160, 173, and 175 cm). Suma is the genotype with the greatest height, 206 cm. Choclo is an early genotype with a small height (117 cm), while the others measure 138 to 152 cm. The intermediate genotypes Quinoa negra, Pasankalla plomo, and Pasankalla reventona exhibited a height of 131 cm, while Pasankalla lila and Tokio rosa measured 140 and 160 cm, respectively. In its centre of origin, quinoa ranges from 70 to 200 cm height (Mujica *et al.*, 2001; DGPA, 2021). In Mexico, studies have been performed where quinoa had 110 to 280 cm height (Mujica *et al.*, 2001).

Regarding seed variables, all genotypes produced seed diameters between 2.0 and 2.2 mm, except Huauzontle, Pata de Venado (late), and Quinoa negra (early), which had smaller diameters. Seed size is one of the most important variables, as it is marketed according to size. Grains larger than 1.8 mm in diameter are reserved for graining (INDECOPI, 2014), which is the most important form of quinoa marketing worldwide. The thousand-kernel weight of the late genotypes ranged from 2.5 to 2.9 g, except Huauzontle (1.9 g), while the early material had a lower weight.

With black quinoa as the exception, the intermediate genotypes had the highest thousand-kernel weight (2.9 to 3.3 g). The hectolitre weight ranged from 64.9 to 69 kg hL⁻¹ for all genotypes, except Huauzontle (late) and black quinoa (intermediate), which reported higher values due to smaller seed size. The results are consistent with those reported by Altuner *et al.* (2019) and Chura *et al.* (2019). Under the conditions evaluated, it is possible to produce quinoa with a seed size suitable for consumption as grain.

For the rest of the variables, 10 of the 16 genotypes had a harvest index of 0.3, while Huauzontle, Roja ku (late), Quinoa negra, Pasankalla plomo (intermediate), Tarpuna and Choclo (early) had a superior harvest index. Tan and Temel (2018) reported that earlier, high-yielding materials had higher harvest rates, unlike what was found in this study. Among the late genotypes, Suyana, Suma, Pata de Venado, Blanca Ayacucho, and Huauzontle showed higher grain yields (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7, and 2967.2 kg ha⁻¹, respectively), while Rojita and Roja ku yields were 1930.9 and 2498.2 kg ha⁻¹. Suyana and Suma are late ecotypes in their place of origin, for which yields of 3500 and 2000 kg ha⁻¹ are reported (Gómez and Aguilar, 2016), lower than those found in this study. Among the intermediate genotypes, Tokio rosa had higher grain yield

(2858.4 kg ha⁻¹), while the others had lower yields. In the early genotypes, Tarpuna had the highest grain yield with 3005.8 kg ha⁻¹; the rest had lower yields.

Yields reported in this study are higher than those 1000-2000 kg ha⁻¹ recorded in the Andean region of South America (DGPA, 2021) but lower than those reported in Chura *et al.* (2019) (2836.55 to 5099.28 kg ha⁻¹). The genotypes Suyana and Suma from the late group, Tokio rosa from the intermediate group, and Tarpuna from the early group may constitute a varietal standard for the commercial cultivation of white grain quinoa in Mexico. The genotypes Pasankalla reventona and Quinoa negra are a good alternative for the production of coloured quinoa, and the genotype Choclo is an option for areas with a short vegetative cycle or as a source of precocity for genetic improvement programs. Overall, these genotypes are good options for the commercial cultivation of quinoa in Mexico, especially for late plantings when other crops cannot thrive. Also, they are excellent options for cereals rotation in high altitude regions with low temperatures or early frosts.

The least favourable environments were Nanacamilpa 2019 and Nanacamilpa 2018; while Santa Lucía de Prías 2019 was the most favourable. There were changes in magnitude and order in the three maturity groups, suggesting that genotypes change their behaviour as growth environment changes (Figure 1). This agrees with previous reports (Ali *et al.*, 2018; Tan and Temel, 2018) which informed that quinoa genotypes interact with the environment. The fact that the Santa Lucía environment was the most favourable may be due to its lower elevation, and therefore higher temperatures. Another probable reason is the higher incidence of downy mildew that occurred in Nanacamilpa during the study.

Among the late genotypes (Figure 1). Suyana had the best performance in favourable environments, followed by Suma genotype, which had the highest performance in the least favourable environment, followed by Pata de Venado. In all environments, the genotypes Blanca Ayacucho, Pata de Venado, and Huauzontle were moderately productive, while Roja ku and Rojita had the lowest yield. It appears normal that the genotypes with higher yields are within this group, since their long cycle and plant size allow higher production of photo-assimilates, and therefore greater quantity of grain (Curti *et al.*, 2016). The genotypes of this group are of inter-Andean origin, where the environment is very similar (Gómez and Aguilar, 2016) to the conditions of this study; which in turn may have influenced their good performance. This group also included Huauzontle, whose yield is comparable to that of the best quinoa, which gives Huauzontle the potential to be used in grain production, in addition to its use as a vegetable.

Among the intermediate maturity genotypes (Figure 1), under favourable conditions, Tokio rosa had the best yield, followed by Quinoa negra and Pasankalla lila, while Pasankalla plomo and Pasankalla reventona had the lowest yield. In intermediate environments, Tokio rosa showed higher yields than the other genotypes. Pasankalla reventona is the genotype with the highest yield in the least favourable environment, followed by Pasankalla plomo, Tokio rosa, and Quinoa negra, while Pasankalla lila

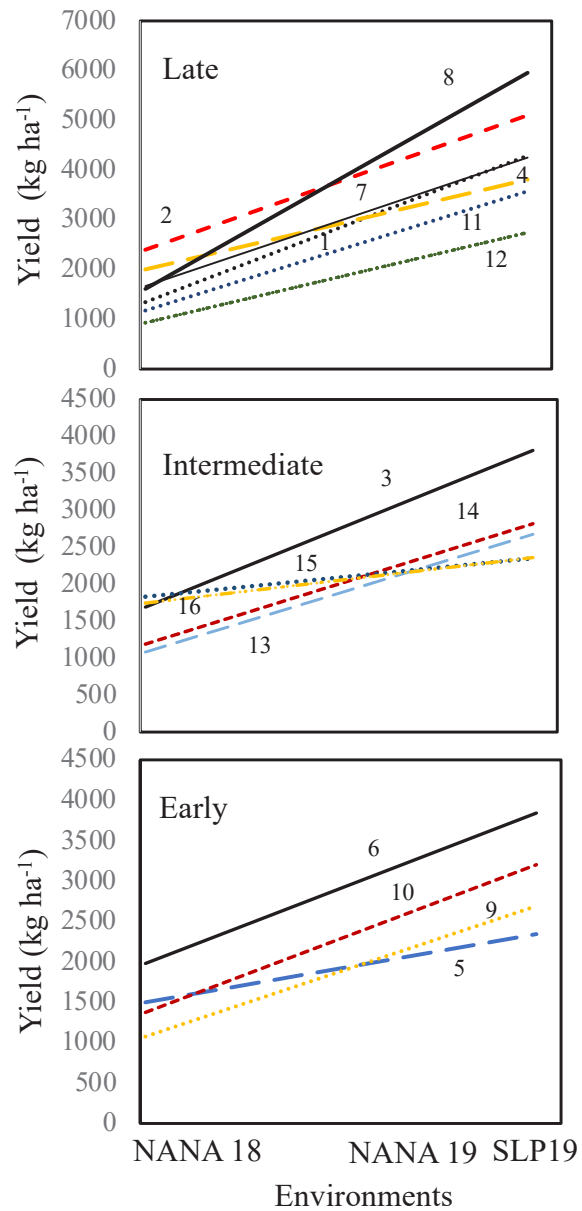


Figure 1. Genotype*environment interaction for yield of 16 genotypes grouped by cycle. Late (1 Huauzontle, 2 Suma, 4 Blanca Ayacucho, 7 Pata de Venado, 8 Suyana, 11 Roja ku and 12 Rojita); Intermediate (3 Tokio rosa, 13 Pasankalla lila, 14 Quinua negra, 15 Pasankalla reventona and 16 Pasankalla plomo); and Early (5 Choclo, 6 Tarpuna, 9 Maranganí and 10 Misa amarilla), evaluated in three environments (NANA18 Nanacamilpa 2018, NANA19 Nanacamilpa 2109 and SLP19 Santa Lucía de Prías 2019).

presented the lowest yield in these conditions. Within the early genotypes, Tarpuna had the best performance in favourable and intermediate environments, followed by Maranganí, Misa amarilla, and Choclo. In less favorable environments, Tarpuna had the best performance, followed by the genotypes Choclo, Marangani, and Misa amarilla.

Based on the behaviour expressed, it can be established that by selecting the appropriate genotype, good yields can be obtained in different environments, especially in those with low rainfall, as the three evaluated environments. The genotypes Suyana, Suma, Tokio rosa, and Tarpuna, due to their way of interacting with the environment, in addition to their high yields in their respective maturity groups and seed size, are good options for producing quinoa in the evaluated environments. The overall behaviour of the quinoa genotypes occurred as it was expected; since most of them come from the region of the Inter-Andean valleys, very similar in altitude and temperature to the Central high-valley lands of Mexico. The high-Andean genotypes (3200 to 4200 m) showed an erratic behaviour.

CONCLUSIONS

The most favourable environment was Santa Lucía de Prías, State of Mexico, while Nanacamilpa, Tlaxcala, 2019 was the most unfavourable. Within the group of late genotypes, Suyana and Suma had the highest grain yield. In the intermediate group, the best genotypes were Tokio rosa and Pasankalla reventona; whereas in the early group Tarpuna was the best.

The genotypes Tarpuna, Misa amarilla, Maranganí, Tokio rosa, and Pasankalla lila were those with the largest diameter and seed weight. Due to their yield and seed size, the genotypes Suyana, Suma, Tokio rosa, and Tarpuna can form a varietal pattern for white grain production. Meanwhile, Pasankalla reventona and black quinoa are good options for the production of coloured quinoa. The genotype Choclo, due to its precocity, is a good alternative for short growing season areas.

REFERENCES

- Ali MB, El-Sadek A, Salem EM. 2018. Stability Parameters and AMMI Analysis of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Egyptian Journal of Agronomy 40: 59–74. <https://doi.org/10.21608/agro.2018.2916.1094>
- Altuner F, Oral E, Kulaz H. 2019. The impact of different sowing-times of the quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and its varieties on the yield and yield components in Turkey-Mardin ecology condition. Applied Ecology and Environmental Research 17 (4): 10105–10117. https://doi.org/10.15666/aeer/1704_1010510117
- Bazile D, Jacobsen S, Verniau A. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. Frontiers in Plant Science 7: 1–6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
- Bosques H, Lemeur R, Van D. 2000. Análisis ecofisiológico del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones de estrés de la sequía y la salinidad. Tropicultura 18: 198–202.
- Chura E, Mujica A, Haussmann B, Smith K, Flores S, Flores AL. 2019. Agronomic characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) progeny from close and distant self-fertilized s5 simple crosses. International Journal of Agriculture and Natural Resources (IJANR) 46: 154–165. <http://dx.doi.org/10.7764/rcia.v46i2.2142>

- Curti RN, De la Vega AJ, Andrade AJ, Bramardi SJ, Bertero HD. 2016. Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in north west Argentina. *Field Crops Research* 189: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.014>
- DGPA (Dirección General de Políticas Agrarias). 2021. Observatorio de las Siembras y Perspectivas de la Producción Quinoa. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Viceministerio de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario. Lima, Perú. pp. 17–37.
- Espitia RE, Valverde RMG, Sesma HLF, Rivas VP, Ayala GAV. 2019. Caracterización de germoplasma de *Chenopodium* spp. en México. *In: Libro de resúmenes del Ministerio de Agricultura. INDAP, Pontificia Universidad Católica de Chile y ODEPA (eds.); VII Congreso Mundial de Quinoa y otros granos andinos. Génesis Impresiones: Santiago, Chile.* pp: 19.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2011. La Quinoa: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. <https://www.fao.org/3/aq287s/aq287s.pdf> (Retrieved: August 2021).
- Gómez PL, Aguilar EC. 2016. Guía de Cultivo de la Quinoa. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. pp: 31–33. <https://www.fao.org/3/i5374s/i5374s.pdf> (Retrieved: August 2021).
- Gonzalez JA, Konishi Y, Bruno M, Valoy M, Prado FE. 2011. Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 92: 1222–1229. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4686>
- Hasegawa PM. 2013. Sodium homeostasis and salt tolerance of plants. *Environmental and Experimental Botany* 92: 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.03.001>
- INDECOPI. 2014. Compendio de normas técnicas peruanas: Quinoa y Cañihua. NTP 205.062.2014. Comisión de Normalización y de Fiscalización de Barreras Comerciales no Arancelarias. Lima, Perú. pp: 1–25.
- Jacobsen SE, Monteros C, Christiansen JL, Bravo LA, Corcuera JL, Mujica A. 2005. Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Organic Chemistry* 22 (2): 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.01.003>
- Jacobsen S. 2003. The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Research International* 19: 167–177. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018883>
- Jacobsen SE. 2017. The scope for adaptation of quinoa in northern latitudes of Europe. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203 (6): 603–613. <https://doi.org/10.1111/jac.12228>
- Katwal TB, Bazile D. 2020. First adaptation of quinoa in the Bhutanese mountain agriculture systems. *PloS ONE* 15 (1): 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219804>
- Mujica A, Izquierdo J, Pierre JM. 2001. Origen y descripción de la quinoa. *In: Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. Mujica A, Jacobsen S, Izquierdo J, Pierre JM. (eds.); FAO/RLC: Santiago, Chile.* pp: 1–8.
- Nowak V, Du J, Charrondiére UR. 2016. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry* 193: 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>
- WHO (World Health Organization). 2017. Climate-resilient water safety plans: managing health risk associated with climate variability and change. Geneva, Switzerland. <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/258722/1/9789241512794-eng.pdf?ua=1> (Retrieved: June 2022).
- Präger A, Munz S, Nkebiwe PM, Mast B, Graeff-Hönninger S. 2018. Yield and quality characteristics of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars grown under field conditions in southwestern Germany. *Agronomy*. 8 (10): 197. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100197>
- Rojas W, Pinto M, Alanoca C, Gómez LP, León-Lobos P, Alercia A, Diulgheroff S, Padulosi S, Bazile D. 2015. Estado de la conservación *ex situ* de los recursos genéticos de Quinoa. *In: State of the Art on Quinoa around the World in 2013. Bazile D, Bertero HD, Nieto C. (eds.); Chap. N° 1.5. FAO/CIRAD: Rome.* pp: 56–82. <https://www.fao.org/3/i4042e/i4042e.pdf> (Retrieved: July 2021).
- SAS Institute Inc. 2012. Statistical Analysis System User's Guide. SAS Institute, Inc. Cary, NC, USA. 956 p.

- Tan M, Temel S. 2017. Studies on the adaptation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to eastern Anatolia Region of Turkey. *Agrofor-International Journal* 2 (2): 33–39. <https://doi.org/10.7251/AGRENG1702033T>
- Tan M, Temel S. 2018. Performance of some quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes grown in different climate conditions. *Turkish Journal of Field Crops* 23 (2): 180–186. <https://doi.org/10.17557/tjfc.485617>
- Tapia M. 1997. Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación (2a Edición). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Santiago, Chile.
- Thiam E, Allaoui A, Benlhabib O. 2021. Quinoa productivity and stability evaluation through varietal and environmental interaction. *Plants* 10 (4): 714. <https://doi.org/10.3390/plants10040714>
- Valenzuela ARN, Mita GT, Zapana FEY, Quilla DC, Miranda RA, Mita UJC. 2015. Efecto de la germinación y cocción en las propiedades nutricionales de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinua* Willd). *Revista de Investigaciones Altoandinas* 17 (2): 169–172.
- Zeglin LH, Bottomley P, Jumpponen A, Rice CW, Arango M, Lindsley A, McGowan A, Mfombep P, Myrold DD. 2013. Altered precipitation regime affects the function and composition of soil microbial communities on multiple time scales. *Ecology* 94 (10): 2334–2345. <https://doi.org/10.1890/12-2018.1>
- Zurita-Silva A, Fuentes F, Zamora P, Jacobsen SE, Schwember AR. 2014. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. *Molecular Breeding* 34: 13–30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023-5>

EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA DE QUINUA EN AMBIENTES DEL ALTIPLANO CENTRAL DE MÉXICO

Miriam Gabriela Valverde-Ramos¹, Eduardo Espitia-Rangel²,
Salvador Miranda-Colín¹, Ignacio Benítez-Riquelme^{1*}

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

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Los Reyes- Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, State of Mexico, Mexico, C. P. 56250.

* Autor para correspondencia: riquelme@colpos.mx

RESUMEN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo que crece en condiciones de estrés ambiental, tiene alto valor nutritivo y potencial agronómico. En México se cultiva y comercializa en pequeña escala. Sin embargo, no se cuenta con variedades ni tecnología para su producción. El objetivo de esta investigación fue determinar el comportamiento de germoplasma de quinua en la región del Altiplano Central de México. Se evaluaron 16 genotipos de diferentes orígenes y características, en tres ambientes de las localidades de Nanacamilpa, Tlaxcala; y Santa Lucía de Prías, Texcoco, Estado de México. Se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) para genotipos. Los genotipos tardíos Suyana, Suma, Pata de Venado, Blanca Ayacucho y Huauzontle mostraron mayor rendimiento de grano (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7 y 2967.2 kg ha⁻¹, respectivamente). De los genotipos intermedios, Tokio rosa y Pasankalla reventona sobresalieron con 2858.4 y 2118.4 kg ha⁻¹ respectivamente. En los genotipos precoces, Tarpuna presentó mayor rendimiento de grano (3005.8 kg ha⁻¹). En lo referente a diámetro de semilla solo Huauzontle y Quinua negra presentaron un tamaño igual o menor a 1.8 mm, el resto de los genotipos puede ser comercializado en grano por su tamaño de semilla. De los ambientes evaluados, el menos favorable fue Nanacamilpa 2019, mientras que Santa Lucía de Prías 2019 fue el ambiente más favorable. En general, el comportamiento de los genotipos evaluados fue el esperado, debido a que la mayoría provienen de la región de los Valles Interandinos, que son muy similares en altitud y temperatura al Altiplano Central de México.

Palabras clave: *Chenopodium quinoa*, adaptación, rendimientos, tamaño de grano, variedades.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático afecta las condiciones de la producción agrícola (Hasegawa, 2013). El impacto en la agricultura y las implicaciones para la seguridad alimentaria son alarmantes. Los agricultores, ganaderos, pescadores y silvicultores comunitarios dependen de actividades indisolublemente ligadas al clima. Estos grupos son también los más vulnerables al cambio climático (FAO, 2016), al proyectarse un aumento en los peligros para la salud humana, sobre todo en las poblaciones de menor ingreso, como

Citation: Valverde-Ramos MG, Espitia-Rangel E, Miranda-Colín S, Benítez-Riquelme I. 2022. Evaluación de germoplasma de quinua en ambientes del Altiplano Central de México. *Agrociencia*. 56(7): 1254-1277. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2572>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: May 02, 2022.

Approved: September 16, 2022.

Published in Agrociencia:
November 03, 2022.

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



consecuencia de las temperaturas extremas y de la disminución de la calidad del agua, del aire y de los alimentos (WHO, 2017). La sequía y salinidad del suelo son uno de los mayores problemas (Zeglin *et al.*, 2013). Ante el continuo incremento de la población, los agricultores necesitan explorar alternativas nuevas para adaptarse a los cambios. La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es uno de los cultivos más antiguos de la región andina de Sudamérica, domesticada hace más de 7000 años en su centro de origen (Perú y Bolivia). Es una especie anual, dicotiledónea, de la familia Amaranthaceae (Bazile *et al.*, 2016). La quinua tiene una gran variabilidad genética. Se cultiva en condiciones de sequía severa, lo cual refleja su adaptabilidad a condiciones agroecológicas de estrés, tales como suelos marginales, bajas temperaturas y fertilidad, sequía, salinidad y ambientes ricos en radiación ultravioleta (Tapia, 1997; Bosque *et al.*, 2000).

Se conocen aproximadamente 40 genotipos comerciales en países andinos, los cuales tienen amplia variabilidad en el color de las plantas, inflorescencia y de semillas. Se caracterizan por tener un hábito de crecimiento ramificado hasta el segundo tercio, con alrededor de 1 a 2 metros de altura. Su ciclo vegetativo y maduración fisiológica es de 4 a 6 meses, y se considera una especie preponderantemente autógama (Mujica *et al.*, 2001; Zurita-Silva *et al.*, 2014; Curti *et al.*, 2016) Esto permite seleccionar, adaptar y cultivar variedades para una amplia gama de condiciones ambientales (Jacobsen, 2003). La quinua es un cultivo en expansión utilizado como alimento humano y en materias primas para animales debido a su alto valor nutritivo. Tiene un alto contenido de vitaminas, proteínas y minerales, y se reporta que provee todos los aminoácidos esenciales para el ser humano (FAO, 2011; Rojas *et al.*, 2015). También se le atribuyen propiedades medicinales, como cicatrizante, desinflamatorio, analgésico y desinfectante (Valenzuela *et al.*, 2015; Nowak *et al.*, 2016). Otra característica de la quinua son las saponinas que se encuentran en la cáscara de la semilla y la ausencia de gluten (Jacobsen *et al.*, 2005).

En lo referente al rendimiento del cultivo, Gómez y Aguilar (2016) reportaron que, en plantaciones en su centro de origen, el rendimiento va de 1200 a 3500 kg ha⁻¹, mientras que DGPA (2021) informó rendimientos de 740 a 3632 kg ha⁻¹. En relación con el potencial en países donde tradicionalmente no se siembra, se reportan rendimientos de 200 hasta 2050 kg ha⁻¹ (Bazile *et al.*, 2016), mientras que Chura *et al.* (2019) registraron de 2836.55 a 5099.18 kg ha⁻¹. El cultivo se ha introducido en regiones de América del Norte, Europa, China y el Medio Este (Jacobsen, 2017; Katwal y Bazile, 2020). La comercialización y el uso de la quinua depende el tamaño de la semilla. Se reportan diámetros de semilla desde 1.2 a 2.5 mm y peso de mil semillas de 2.09 a 3.8 g (Zurita-Silva *et al.*, 2014; Chura *et al.*, 2019).

En México, la quinua es una alternativa para la producción de alimentos de alta calidad que contribuyen a resolver problemas nutricionales. Es una alternativa para siembras tardías y para la rotación de cultivos. Sin embargo, se cultiva en pequeña escala y no se cuenta con variedades ni tecnología para su producción (Espitia *et al.*, 2019). El objetivo de este estudio fue determinar el comportamiento agronómico de 16 genotipos de quinua para evaluar su adaptabilidad en la región del Altiplano Central de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron 15 genotipos introducidos recientemente de Perú, Ecuador y Bolivia, y un Huauzontle (también conocido como la quinua mexicana). Estos materiales fueron seleccionados a partir de una caracterización realizada en INIFAP – CEVAMEX, donde se eligieron los materiales adaptados a las condiciones del Altiplano Central de México (Cuadro 1).

Localización y condiciones climatológicas

Los genotipos se evaluaron en dos localidades: Santa Lucía de Prías, Texcoco, Estado de México (19° 26' 42'' N, 98° 53' 15'' O), en el año 2019; y Nanacamilpa, Tlaxcala, en los años 2018 y 2019 (19° 29' 22'' N, 98° 33' 46'' O). Esos lugares cuentan con condiciones ambientales (Cuadro 2) parecidas a los valles interandinos de donde son

Cuadro 1. Genotipos de *Chenopodium* utilizados en el estudio.

No.	Nombre	Color del fruto	Tipo de quinua	Región ecológica de origen
1	Huauzontle	Amarillo	Amarga	Valles altos
2	Suma	Verde	Dulce	Altiplano
3	Tokio rosa	Verde	Amarga	Altiplano
4	Blanca Ayacucho	Verde	Blanco	Valles interandinos
5	Choclo	Verde	Dulce	Valles altoandinos
6	Tarpuna	Verde	Amarga	Valles interandinos
7	Pata de Venado	Verde	Dulce	Valles interandinos
8	Suyana	Amarillo	Amarga	Valles interandinos
9	Misa amarilla	Amarillo	Amarga	Valles interandinos
10	Maranganí	Amarillo	Amarga	Valles interandinos
11	Roja ku	Rojo	Amarga	Altiplano
12	Rojita	Rojo	Blanca	Altiplano
13	Pasankalla lila	Gris	Dulce	Altiplano
V14	Quinua negra	Gris	Dulce	Altiplano
15	Pasankalla reventona	Gris	Dulce	Altiplano
16	Pasankalla plomo	Gris	Dulce	Altiplano

Cuadro 2. Tipo de suelo y precipitación en los tres ambientes de evaluación. P-V 2018-2019.

Localidad	Altitud (m)	Tipo de suelo	Precipitación en el ciclo (mm)
Nanacamilpa, Tlaxcala. 2018	2829	Sandy-loam	299.6
Nanacamilpa, Tlaxcala. 2019	2829	Sandy-loam	364.05
Santa Lucía de Prías, Estado de México. 2019	2250	Sandy-loam	263.6

originarios la mayoría de los genotipos del ensayo. Las fechas de siembra fueron en Nanacamilpa, 25 de julio (2018) y 18 de junio (2019); en Santa Lucía de Prías, 28 de junio (2019).

Diseño experimental y manejo del cultivo

En cada experimento los genotipos se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con seis repeticiones; la parcela experimental consistió en tres surcos de 5 m de largo con 0.8 m de separación. El cultivo se condujo en condiciones de secano (temporal), sin fertilización. En todos los experimentos se realizaron dos deshierbes manuales 25 y 45 días después de la siembra (dds).

Variables estudiadas

Se registraron las siguientes variables: días a la emergencia de la panoja (d), días a la madurez (d) y periodo de llenado de grano (d). Los dos primeros se registraron al tener el 50 % de las plantas de cada parcela el primordio de la inflorescencia o la madurez fisiológica del grano, respectivamente. Se midió el diámetro del tallo (cm) de 10 plantas representativas por parcela en la floración, y se registró la altura de la planta (cm) a la madurez del grano. El rendimiento biológico se tomó de muestras representativas de biomasa aérea (500 g), las cuales se secaron a 60 °C hasta obtener un peso constante, y se extrapolaron a áreas útiles de 3 m². El diámetro de semilla (cm) se obtuvo de 10 grupos de 10 semillas por parcela, con un vernier digital (Stainless Hardened). El peso hectolítrico (kg hL⁻¹) se determinó a partir del peso de un volumen conocido de semilla y se extrapoló al peso de 100 L. El peso de mil granos (g) se determinó con base en el peso de cinco grupos de 100 granos por parcela, y el rendimiento de grano (kg ha⁻¹) se midió en 3 m del surco central y se extrapoló por hectárea. El índice de cosecha se estimó mediante la relación entre el rendimiento económico y el rendimiento biológico.

Análisis de datos

Los datos se analizaron por medio del procedimiento GLM del programa SAS® (SAS 9.4 2012). Se realizó un análisis de varianza para ambientes y genotipos. Se realizaron pruebas de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación de medias entre ambientes y genotipos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tanto en ambientes como en genotipos, se encontraron diferencias significativas en $p \leq 0.01$ para todas las variables (Cuadro 3). Para la interacción genotipo*ambiente, se encontró diferencia significativa en $p \leq 0.01$ para la mayoría de las variables, excepto diámetro de tallo, diámetro de semilla e índice de cosecha. Esto sugiere una respuesta diferencial de los genotipos y los ambientes evaluados. Thiam *et al.* (2021) reportaron diferencia significativa en diámetro de tallo, contrario a lo encontrado en este estudio. Tan y Temel (2018) encontraron diferencias significativas para ambiente, genotipo e

Cuadro 3. Cuadrados medios para las variables estudiadas de 16 genotipos de quinua, en tres ambientes de secano en el Altiplano Central de México. P-V 2018-2019.

Fuente gl.	Ambiente 2	REP(AMB) 15	Genotipos 15	GEN*AMB 30	Error 225
Emergencia de panoja (d)	7821.21**	10.63	980.82**	24.31**	4.66
Días a madurez (d)	18871.34**	9.31	1541.75**	113.49**	3.66
Llenado de grano (d)	4764.83**	8.77	1207.45**	103.81**	11.10
Diámetro de tallo (cm)	674.05**	4.82	14.84**	2.98ns	2.17
Altura de planta (cm)	91604.67**	460.42	8238.28**	420.00**	147.42
Diámetro de semilla (mm)	0.985**	0.026	0.318**	0.028ns	0.035
Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	158.68**	13.10	51.33**	8.90**	2.94
Índice de cosecha	1.225**	0.0332	0.041ns	0.030ns	0.035
Peso de mil granos (g)	6.16**	0.06	2.46**	0.16**	0.05
Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	64686655**	1180719	8253981**	1231658**	389088

d: días. Diferente con ** $p \leq 0.01$ y * $p \leq 0.05$; ns, sin diferencias.

interacción genotipo*ambiente con $p \leq 0.01$ en rendimiento, peso de mil granos, días a madurez y altura de la planta.

En la comparación de medias por ambiente (Cuadro 4), para las variables fenológicas el ambiente Nanacamilpa 2019 obtuvo mayor emergencia de panoja y días a madurez (d), mientras que Santa Lucía de Prías obtuvo mayor periodo de llenado de grano (d). Por otra parte, Nanacamilpa 2018 presentó valor menor en estas tres variables. En Perú la quinua madura en más de 190 d, con mayor periodo de llenado de grano (Gómez y Aguilar 2016), debido su crecimiento a 3900 m; mientras que en México las condiciones de siembra fueron a 2250 y 2829 m. Präger *et al.* (2018) mencionaron que

Cuadro 4. Comparación de medias de 10 variables evaluadas en tres ambientes de secano en el Altiplano Central de México. P-V 2018-2019.

Variable /Ambiente	Nanacamilpa 2018	Nanacamilpa 2019	Santa Lucía de Prías 2019
Emergencia de panoja (d)	44.11c	61.50a	48.90b
Días a madurez (d)	120.08c	147.39a	139.23b
Llenado de grano (d)	65.41c	73.98b	79.37a
Diámetro de tallo (cm)	12.29b	9.11c	14.38a
Altura de planta (cm)	148.55b	120.00c	181.73a
Diámetro de semilla (mm)	2.16a	2.03b	1.95c
Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	66.31c	68.70bc	68.34a
Índice de cosecha	0.376a	0.434a	0.216b
Peso de mil granos (g)	3.08a	2.78b	2.57c
Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	2743.4b	1734.5c	3360.7a

d: días. Medias por columna con letra distinta presentaron diferencia estadística ($p \leq 0.05$).

el periodo de crecimiento varía entre 122 y 154 d, lo que concuerda con lo encontrado en este estudio.

Las variables de tamaño, la altura de la planta y el diámetro del tallo en la madurez fueron mayores en Santa Lucía de Prías, mientras que Nanacamilpa 2019 presentó los valores más bajos. Chura *et al.* (2019) reportaron valores de diámetro de tallo de 9.70 a 14.49 mm, lo cual es consistente con los resultados encontrados en este estudio. González *et al.* (2011) reportaron alturas de planta de 61.4 a 98.6 cm a la madurez, diferente a lo reportado en este estudio.

Para las variables de semilla, Nanacamilpa 2018 presentó mayor peso de mil granos y diámetro de semilla, pero menor peso hectolítrico. Por otro lado, Nanacamilpa 2019 y Santa Lucía de Prías mostraron un mayor peso hectolítrico. Estos resultados son consistentes con los reportados por Altuner *et al.* (2019). En el ambiente de Santa Lucía de Prías, los valores bajos de peso de mil granos y diámetro de semilla corresponden a lo obtenido por Chura *et al.* (2019). Nanacamilpa 2018 y 2019 tuvieron mayor índice de cosecha, seguido de Santa Lucía de Prías; estos valores son superiores a los reportados por Tan y Temel (2017). Por último, del ambiente de Santa Lucía de Prías se obtuvo mayor rendimiento, lo cual corresponde con lo reportado por Chura *et al.* (2019). Por el contrario, el menor rendimiento se obtuvo en Nanacamilpa 2019, lo cual corresponde con González *et al.* (2011) y Tan y Temel (2017).

En la comparación de medias por genotipo (Cuadro 5), en las variables fenológicas, los genotipos Suma, Blanca Ayacucho, Suyana, Huauzontle, Pata de Venado, Rojita y Roja ku tuvieron un periodo de crecimiento más tardío de 140 a 149 d. Los materiales más precoces fueron Tarpuna, Choclo, Maranganí y Misa amarilla (116, 124 y 125 d, respectivamente). Los genotipos restantes tuvieron un periodo de crecimiento intermedio.

Los genotipos precoces mostraron el periodo de llenado de grano más corto, de 61 a 64 d, a excepción de Huauzontle, que es un genotipo tardío con un periodo de llenado de grano de 60 d. Huauzontle y Suma tuvieron tiempos de emergencia de panoja más largos (71 y 62 d); los demás ejemplares tardíos mostraron de 46 a 57 d. Choclo mostró menos días de emergencia (41 d), mientras que los genotipos precoces restantes fueron de 50 a 53 d. El tiempo de emergencia de panoja para los genotipos intermedios fue de 45 a 49 d; otros estudios en México que evaluaron 36 variedades de quinua mostraron una amplitud de 148 a 203 d a la madurez (Mujica *et al.*, 2001). En su centro de origen, la quinua tiene un periodo de crecimiento entre 90 y 210 d (Zurita-Silva *et al.*, 2014; Gómez y Aguilar, 2016).

En las variables de tamaño, el diámetro del tallo varió de 11.2 a 12.3 mm para los genotipos tempranos, y de 11.3 a 13.7 mm para los genotipos tardíos. Los valores encontrados en este estudio concuerdan con los de Chura *et al.* (2019). Pata de Venado, Rojita y Roja ku fueron los genotipos tardíos con menor altura a la madurez (142, 149 y 150 cm), seguidos de Huauzontle, Suyana y Blanca Ayacucho (160, 173 y 175 cm). Suma es el genotipo con mayor altura, 206 cm. Choclo es un genotipo precoz con una altura pequeña (117 cm), mientras que los otros miden de 138 a 152 cm. Los genotipos intermedios Quinua negra, Pasankalla plomo y Pasankalla reventona mostraron una altura de 131 cm, mientras que Pasankalla lila y Tokio rosa midieron 140 y 160 cm, res-

Cuadro 5. Comparación de medias de 16 genotipos de quinua evaluados en tres ambientes de secano en la Altiplano Central de México. P-V 2018-2019.

Variables/ Genotipo	EPA	MAD	LLG	DIT	ALM	DIS	PEH	IC	PMG	REN
Tardíos										
Suma	62b	149a	73bcd	13.7a	206a	2.1ac	66.7cde	0.3d	2.7cd	3888.3a
Blanca Ayacucho	50def	146ab	83a	13.0abc	175b	2.0cd	67.5cde	0.3cd	2.8cd	2999.7acd
Suyana	57c	143abc	72cd	13.5ab	173b	2.1ac	67.4cde	0.3acd	2.9ac	4004.9a
Huauzontle	71a	142abcd	60e	12.0abcde	160bc	1.7e	71.8a	0.4ac	1.9g	2967.2acd
Pata de Venado	49efg	142abcd	81ab	11.0de	150cde	1.9cde	68.9c	0.3acd	2.5c	3091.1ac
Rojita	53cd	141bcd	76abc	11.1cde	149cdef	2.1ac	67.7cde	0.3c	2.6cd	1930.9d
Roja ku	46fgh	140bcd	83a	11.3cde	142cdef	2.0ac	67.8cd	0.4acd	2.7df	2498.2cd
Intermedios										
Tokio rosa	49efgh	139bcd	80ab	12.7abcd	160bc	2.2a	69.0c	0.3acd	2.9acd	2858.4cd
Pasankalla lila	48efgh	135cde	76abc	10.7e	140def	2.2ac	67.4cde	0.3acd	2.9a	1960.2d
Quinua negra	45hil	135de	80abc	11.1de	131efg	1.8de	69.9a	0.4acd	2.3a	2087.6cd
Pasankalla plomo	46gh	130ef	74bc	11.6cde	131fg	2.1ac	66.5cde	0.4acd	3.3a	2084.9cd
Pasankalla reventona	46gh	129ef	73bc	11.7bcde	131efg	2.1ac	67.0cde	0.3acd	3.3a	2118.4cd
Precoces										
Tarpuna	53ced	125f	63e	12.1abcde	152cd	2.2a	68.3c	0.4a	3.0a	3005.8acd
Misa amarilla	50defg	125f	62e	12.0abcde	138def	2.2a	64.9e	0.3acd	3.0a	1965.8d
Maranganí	53de	124fg	61e	12.3abcde	149cdef	2.2a	68.5c	0.3acd	3.0acd	2381.9cd
Choclo	41i	116g	64de	11.2cde	117g	2.0acd	65.2de	0.4a	2.8cd	1964.7d

EPA: emergencia de panoja (días), MAD: días a madurez (días), LLG: llenado de grano (días), DIT: diámetro de tallo (cm), ALM: altura de planta (cm), DIS: diámetro de semilla (mm), PHE: peso hectolítrico (kg hL⁻¹), IC: índice de cosecha, PMG: peso de mil granos (g) y REN: rendimiento de grano (kg ha⁻¹). Medias por columna con letra distinta presentaron diferencia estadística ($p \leq 0.05$).

pectivamente. En su centro de origen, la quinua va de 70 a 200 cm de altura (Mujica *et al.*, 2001; DGPA, 2021). En México, se han realizado estudios donde la quinua alcanzó alturas de 110 a 280 cm (Mujica *et al.*, 2001).

En lo referente a las variables de semilla, todos los genotipos produjeron diámetros de semilla entre 2.0 a 2.2 mm, excepto Huauzontle, Pata de Venado (tardía) y Quinua negra (precoz), que tuvieron diámetro menor. El tamaño de la semilla es una de las variables más importantes, al ser comercializada en función de su tamaño. Los granos mayores a 1.8 mm de diámetro se reservan para graneado (INDECOPI, 2014), que es la forma más importante de comercialización de la quinua a nivel mundial. El peso de mil granos de los genotipos tardíos varió de 2.5 a 2.9 g, excepto Huauzontle (1.9 g), mientras que el material precoz tuvo un peso menor.

Con excepción de la quinua negra, los genotipos intermedios presentaron el mayor peso de mil granos (2.9 a 3.3 g). El peso hectolítrico varió de 64.9 a 69 kg hL⁻¹ para todos los genotipos excepto Huauzontle (tardío) y Quinua negra (intermedio), que reportaron valores más altos debido al menor tamaño de semilla. Los resultados son

consistentes con lo reportado por Altuner *et al.* (2019) y Chura *et al.* (2019). Bajo las condiciones evaluadas, es posible producir quinua con un tamaño de semilla apto para el consumo como grano.

Para el resto de las variables, 10 de los 16 genotipos tuvieron un índice de cosecha de 0.3, mientras que Huauzontle, Roja ku (tardíos), Quinua negra, Pasankalla plomo (intermedios), Tarpuna y Choclo (precoces) tuvieron un índice de cosecha superior. Tan y Temel (2018) reportaron que los materiales más precoces y de alto rendimiento tenían índices de cosecha más altos, a diferencia de lo encontrado en este estudio. Entre los genotipos tardíos, Suyana, Suma, Pata de Venado, Blanca Ayacucho y Huauzontle mostraron mayor rendimiento de grano (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7 y 2967.2 kg ha⁻¹, respectivamente), mientras que para Rojita y Roja ku fue de 1930.9 y 2498.2 kg ha⁻¹. Suyana y Suma son ecotipos tardíos en su lugar de origen, para los que se reportan rendimientos de 3500 y 2000 kg ha⁻¹ (Gómez y Aguilar, 2016), inferiores a los encontrados en este estudio. Entre los genotipos intermedios, Tokio rosa tuvo mayor rendimiento de grano (2858.4 kg ha⁻¹), mientras que los demás tuvieron rendimientos menores. En los genotipos precoces, Tarpuna tuvo el mayor rendimiento de grano con 3005.8 kg ha⁻¹; el resto tuvo rendimientos más bajos.

Los rendimientos reportados en este estudio son mayores a los 1000-2000 kg ha⁻¹ registrados en la región andina de Sudamérica (DGPA, 2021) pero menores a lo consignado en Chura *et al.* (2019) (2836.55 a 5099.28 kg ha⁻¹). Los genotipos Suyana y Suma del grupo tardío, Tokio rosa del intermedio y Tarpuna del grupo precoz podrían constituir un patrón varietal para el cultivo comercial de quinua de grano blanco en México. Los genotipos Pasankalla reventona y Quinua negra son una buena alternativa para la producción de quinua de color, y el genotipo Choclo es una opción para zonas con ciclo vegetativo corto o como fuente de precocidad para programas de mejora genética. En general, estos genotipos son buenas opciones para el cultivo comercial de quinua en México, en especial para siembras de fechas tardías cuando otros cultivos no pueden prosperar. Además, estos genotipos son una excelente opción de rotación a cereales en regiones de gran altitud donde se tienen bajas temperaturas o heladas tempranas. Los ambientes menos favorables fueron Nanacamilpa 2019 y Nanacamilpa 2018; mientras que Santa Lucía de Prías 2019 fue el más favorable. Se produjeron cambios en magnitud y orden en los tres grupos de madurez, lo cual sugiere que los genotipos cambian su comportamiento a medida que su ambiente de crecimiento cambia (Figura 1). Esto coincide con otros estudios (Ali *et al.*, 2018; Tan and Temel, 2018) en los cuales se mencionó que los genotipos de quinua interactúan con el ambiente. El hecho de que el ambiente de Santa Lucía resultara el más favorable puede deberse a su menor elevación y por lo tanto, temperaturas más altas. Otra razón probable es la incidencia mayor de mildiú que se presentó en Nanacamilpa durante el estudio.

Entre los genotipos tardíos (Figura 1). Suyana tuvo el mejor rendimiento en los ambientes favorables, seguido de Suma, que es el genotipo con el mayor rendimiento en el ambiente menos favorable, seguido de Pata de Venado. En todos los ambientes, los genotipos: Blanca Ayacucho, Pata de Venado y Huauzontle fueron moderadamente

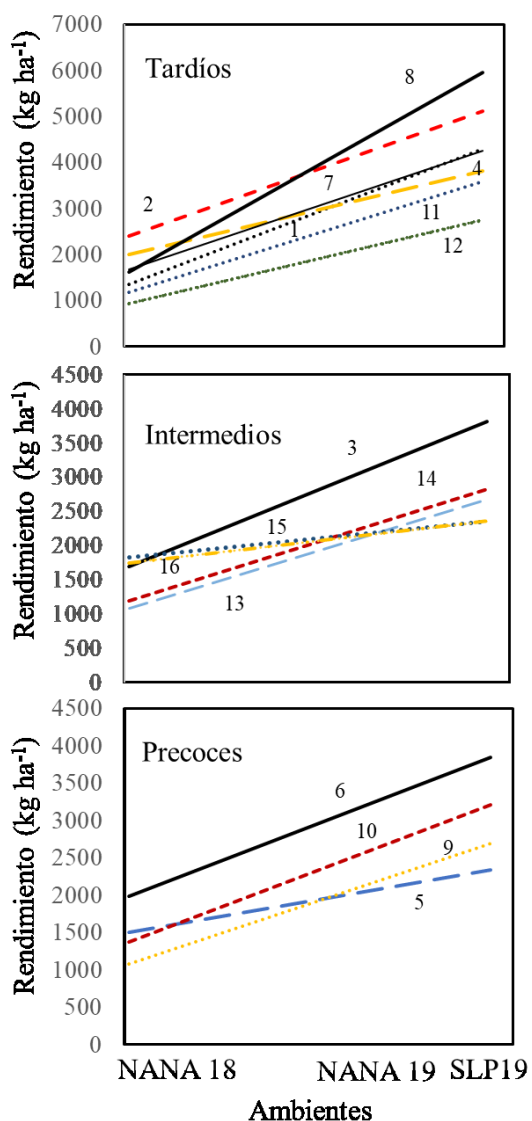


Figura 1. Interacción genotipo*ambiente para rendimiento de 16 genotipos agrupados por ciclo. Tardíos (1 Huauzontle, 2 Suma, 4 Blanca Ayacucho, 7 Pata de Venado, 8 Suyana, 11 Roja ku y 12 Rojita); Intermedios (3 Tokio rosa, 13 Pasankalla lila, 14 Quinua negra, 15 Pasankalla reventona y 16 Pasankalla plomo); y Precoces (5 Choclo, 6 Tarpuna, 9 Maranganí y 10 Misa amarilla), evaluados en tres ambientes (NANA18 Nanacamilpa 2018, NANA19 Nanacamilpa 2109 y SLP19 Santa Lucía de Prías 2019).

productivos, mientras que Roja ku y Rojita tuvieron el menor rendimiento. Resulta normal que dentro de este grupo estén los genotipos con mayor rendimiento, pues su ciclo largo y porte de planta permiten mayor producción de fotoasimilados y por lo tanto, mayor cantidad de grano (Curti *et al.*, 2016). Los genotipos de este grupo son de origen interandino, donde el ambiente es muy parecido (Gómez y Aguilar, 2016) a las

condiciones de este estudio; lo cual pudo haber influido para su buen desempeño. En este grupo también se incluyó el Huauzontle, cuyo rendimiento es comparable al de la mejor quinua; esto convierte a Huauzontle en potencial para utilizarse en la producción de grano, además de su uso como hortaliza.

Entre los genotipos de madurez intermedia (Figura 1), en condiciones favorables, Tokio rosa tuvo el mejor rendimiento, seguido de Quinua negra y Pasankalla lila, mientras que Pasankalla plomo y Pasankalla reventona tuvieron el menor rendimiento. En ambientes intermedios Tokio rosa presentó mayor rendimiento por encima de los demás genotipos. Pasankalla reventona es el genotipo con el mayor rendimiento en el ambiente menos favorable, seguido de Pasankalla plomo, Tokio rosa y Quinua negra, mientras que Pasankalla lila presentó el menor rendimiento en estas condiciones. En los genotipos precoces, Tarpuna tiene el mejor rendimiento en ambientes favorables e intermedios, seguida de Maranganí, Misa amarilla y Choclo. En los ambientes menos favorables Tarpuna tiene el mejor rendimiento, seguida de los genotipos Choclo, Maranganí y Misa amarilla.

Con base en el comportamiento expresado se puede establecer que seleccionando el genotipo adecuado se pueden tener buen rendimiento en diferentes ambientes; en especial aquellos con baja precipitación como los tres ambientes evaluados. Los genotipos Suyana, Suma, Tokio rosa y Tarpuna, por su manera de interactuar con el ambiente, además de sus altos rendimientos en sus respectivos grupos de madurez y tamaño de semilla, son buenas opciones para producir quinua en los ambientes evaluados. El comportamiento general de los genotipos de quinua fue el esperado; ya que la mayoría provienen de la región de los valles interandinos, muy similares en altitud y temperatura al Altiplano Central de México. Los genotipos altoandinos (3200 a 4200 m) presentaron un comportamiento errático.

CONCLUSIONES

El ambiente más favorable fue Santa Lucía de Prías, Estado de México, mientras que Nanacamilpa, Tlaxcala, 2019 fue el más desfavorable. Dentro del grupo de genotipos tardíos, Suyana y Suma fueron los que presentaron mayor rendimiento de grano. En el grupo intermedio los mejores genotipos fueron Tokio rosa y Pasankalla reventona, mientras que en el grupo de precoces Tarpuna fue la mejor.

Los genotipos Tarpuna, Misa amarilla, Maranganí, Tokio rosa y Pasankalla lila fueron los que presentaron mayor diámetro y peso de semilla. Por su rendimiento y tamaños de semilla, los genotipos Suyana, Suma, Tokio rosa y Tarpuna pueden conformar un patrón varietal para la producción de grano blanco. En tanto que Pasankalla reventona y quinua negra son buena opción para la producción de quinua de color. El genotipo Choclo, por su precocidad, es una buena alternativa para zonas de estación de crecimiento corta.

REFERENCIAS

- Ali MB, El-Sadek A, Salem EM. 2018. Stability Parameters and AMMI Analysis of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Egyptian Journal of Agronomy* 40: 59–74. <https://doi.org/10.21608/agro.2018.2916.1094>
- Altuner F, Oral E, Kulaz H. 2019. The impact of different sowing-times of the quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and its varieties on the yield and yield components in Turkey-Mardin ecology condition. *Applied Ecology and Environmental Research* 17 (4): 10105–10117. https://doi.org/10.15666/aeer/1704_1010510117
- Bazile D, Jacobsen S, Verniau A. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. *Frontiers in Plant Science* 7: 1–6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
- Bosques H, Lemeur R, Van D. 2000. Análisis ecofisiológico del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones de estrés de la sequía y la salinidad. *Tropicultura* 18: 198–202.
- Chura E, Mujica A, Haussmann B, Smith K, Flores S, Flores AL. 2019. Agronomic characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) progeny from close and distant self-fertilized s5 simple crosses. *International Journal of Agriculture and Natural Resources (IJANR)* 46: 154–165. <http://dx.doi.org/10.7764/rcia.v46i2.2142>
- Curti RN, De la Vega AJ, Andrade AJ, Bramardi SJ, Bertero HD. 2016. Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in north west Argentina. *Field Crops Research* 189: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.014>
- DGPA (Dirección General de Políticas Agrarias). 2021. Observatorio de las Siembras y Perspectivas de la Producción Quinoa. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Viceministerio de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario. Lima, Perú. pp. 17–37.
- Espitia RE, Valverde RMG, Sesma HLF, Rivas VP, Ayala GAV. 2019. Caracterización de germoplasma de *Chenopodium* spp. en México. In: Libro de resúmenes del Ministerio de Agricultura. INDAP, Pontificia Universidad Católica de Chile y ODEPA (eds.); VII Congreso Mundial de Quinoa y otros granos andinos. Génesis impresiones: Santiago, Chile. pp: 19.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2011. La Quinoa: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. <https://www.fao.org/3/aq287s/aq287s.pdf> (Recuperado: agosto 2021).
- Gómez PL, Aguilar EC. 2016. Guía de Cultivo de la Quinoa. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. pp: 31–33. <https://www.fao.org/3/i5374s/i5374s.pdf> (Recuperado: agosto 2021).
- Gonzalez JA, Konishi Y, Bruno M, Valoy M, Prado FE. 2011. Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 92: 1222–1229. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4686>
- Hasegawa PM. 2013. Sodium homeostasis and salt tolerance of plants. *Environmental and Experimental Botany* 92: 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.03.001>
- INDECOPI. 2014. Compendio de normas técnicas peruanas: Quinoa y Cañihua. NTP 205.062.2014. Comisión de Normalización y de Fiscalización de Barreras Comerciales no Arancelarias. Lima, Perú. pp: 1–25.
- Jacobsen SE, Monteros C, Christiansen JL, Bravo LA, Corcuera JL, Mujica A. 2005. Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Organic Chemistry* 22 (2): 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.01.003>
- Jacobsen S. 2003. The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Research International* 19: 167–177. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018883>
- Jacobsen SE. 2017. The scope for adaptation of quinoa in northern latitudes of Europe. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203 (6): 603–613. <https://doi.org/10.1111/jac.12228>
- Katwal TB, Bazile D. 2020. First adaptation of quinoa in the Bhutanese mountain agriculture systems. *PloS ONE* 15 (1): 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219804>
- Mujica A, Izquierdo J, Pierre JM. 2001. Origen y descripción de la quinua. In: Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. Mujica A, Jacobsen S, Izquierdo J, Pierre JM. (eds.); FAO/RLC: Santiago, Chile. pp: 1–8.

- Nowak V, Du J, Charrondière UR. 2016. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry* 193: 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>
- WHO (World Health Organization). 2017. Climate-resilient water safety plans: managing health risk associated with climate variability and change. Geneva, Switzerland. <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/258722/1/9789241512794-eng.pdf?ua=1> (Recuperado: junio 2022).
- Präger A, Munz S, Nkebiwe PM, Mast B, Graeff-Hönninger S. 2018. Yield and quality characteristics of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars grown under field conditions in southwestern Germany. *Agronomy* 8 (10): 197. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100197>
- Rojas W, Pinto M, Alanoca C, Gómez LP, León-Lobos P, Alercia A, Diulgheroff S, Padulosi S, Bazile D. 2015. Estado de la conservación *ex situ* de los recursos genéticos de Quinoa. *In: State of the Art on Quinoa around the World in 2013*. Bazile D, Bertero HD, Nieto C. (eds.); Chap. N° 1.5. FAO/CIRAD: Rome. pp: 56–82. <https://www.fao.org/3/i4042e/i4042e.pdf> (Recuperado: julio 2021).
- SAS Institute Inc. 2012. *Statistical Analysis System User's Guide*. SAS Institute, Inc. Cary, NC, USA. 956 p.
- Tan M, Temel S. 2017. Studies on the adaptation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to eastern Anatolia Region of Turkey. *Agrofor-International Journal* 2 (2): 33–39. <https://doi.org/10.7251/AGRENG1702033T>
- Tan M, Temel S. 2018. Performance of some quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes grown in different climate conditions. *Turkish Journal of Field Crops* 23 (2): 180–186. <https://doi.org/10.17557/tjfc.485617>
- Tapia M. 1997. *Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación (2a Edición)*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Santiago, Chile.
- Thiam E, Allaoui A, Benlhabib O. 2021. Quinoa productivity and stability evaluation through varietal and environmental interaction. *Plants* 10 (4): 714. <https://doi.org/10.3390/plants10040714>
- Valenzuela ARN, Mita GT, Zapana FEY, Quilla DC, Miranda RA, Mita UJC. 2015. Efecto de la germinación y cocción en las propiedades nutricionales de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Revista de Investigaciones Altoandinas* 17 (2): 169–172.
- Zeglin LH, Bottomley P, Jumpponen A, Rice CW, Arango M, Lindsley A, McGowan A, Mfombep P, Myrold DD. 2013. Altered precipitation regime affects the function and composition of soil microbial communities on multiple time scales. *Ecology* 94 (10): 2334–2345. <https://doi.org/10.1890/12-2018.1>
- Zurita-Silva A, Fuentes F, Zamora P, Jacobsen SE, Schwember AR. 2014. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. *Molecular Breeding* 34: 13–30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023-5>

INTERVARIETAL CROSSES, AN ALTERNATIVE FOR INCREASING YELLOW MAIZE (*Zea mays* L.) PRODUCTION IN VARIABLE ENVIRONMENTS

Roberto de la Cruz **Díaz-Juárez**¹, Amalio **Santacruz-Varela**^{1*}, Fernando **Castillo-González**¹,
Noel Orlando **Gómez-Montiel**², J. Jesús **García-Zavala**¹, Abel **Muñoz-Orozco**^{1†}

¹ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Iguala. Carretera Iguala-Tuxpan km 2.5, Iguala de la Independencia, Guerrero, México. C. P. 40000.

* Author for correspondence: asvarela@colpos.mx

ABSTRACT

In Mexico, maize (*Zea mays* L.) is grown under rainfed conditions within innumerable number of variable environments that limit production. To cope with these adversities, genotypes of different genetic constitution have been generated, such as intervarietal crosses; however, knowledge of the yield potential of those crosses in variable environments is limited. The objective of the study was to determine the yield potential of intervarietal crosses of yellow maize in environments of high-valley lands in central Mexico, as well as the components that influence yield under the hypothesis that intervarietal crosses are equal in yield to conventional hybrids. Crosses, open-pollinated parental varieties and commercial controls were evaluated in a randomized complete block design. Fifteen agronomic variables and yield components were measured. A combined analysis of variance and comparison of means (Tukey, $p \leq 0.05$) were applied, and Pearson's correlation coefficients were calculated. The analysis of variance detected statistical differences in all the factors of variation in most of the evaluated variables. The intervarietal crosses performed statistically equal to the controls but superior to the parents. The crosses excelled in ear diameter and ear length, total weight of grains in the ear, 100-grain weight, grain length, grain width, plant height, ear height, shelling corn coefficient and prolificacy index. In 23 crosses, the genotype \times environment interaction effect was not significant. Intervarietal crosses have yield potential compared to conventional hybrids. Ear and grain traits had the greatest influence on yield. Intervarietal crosses represent an alternative to increase yield and production of yellow maize in the high-valley lands of central Mexico.

Keywords: *Zea mays* L., yield, yield components, agronomic traits, genotype \times environment interaction.

Citation: Díaz-Juárez RC, Santacruz-Varela A, Castillo-González F, Gómez-Montiel NO, García-Zavala JJ, Muñoz-Orozco A. 2022. Intervarietal crosses, an alternative for increasing yellow maize (*Zea mays* L.) production in variable environments.

Agrociencia. 56(7): 1278-1302. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2603>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: May 04, 2022.
Approved: September 30, 2022.
Published in *Agrociencia*:
November 29, 2022.

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



INTRODUCTION

In Mexico, yellow maize (*Zea mays* L.) is mainly used in the livestock and industrial sector, but the volume produced does not meet the national demand and about 70 % is imported (SIAP, 2021). Thus, it is necessary to increase production, either by extending the cultivated area or by increasing yield per area unit. Higher yields can be obtained with improvements in agronomic management or with the development of genotypes through plant breeding (Duvick, 2005). Genetic improvement programs have allowed the development of improved maize genotypes, such as local/traditional open-pollinated varieties (OPV) and hybrids. Regarding hybrids, conventional and non-conventional hybrids can be developed, such as top crosses lines and intervarietal crosses.

In Mexico, the use of conventional hybrids is not adopted on a large scale due to several factors, such as the high cost of acquiring the seed (García-Salazar and Guzmán-Soria, 2015). They are developed for flat areas and fertile agricultural lands (Freshley and Delgado-Serrano, 2020), lack of infrastructure, high demand for inputs and lack of adaptation to diverse environments (Pixley, 2006; García-Salazar y Guzmán-Soria, 2015). Furthermore, there are diverse conditions of climate, rugged orography and soil types that create a mega diversity of environments, micro-regions and ecological niches (Muñoz *et al.*, 2009), conditions in which conventional hybrids do not thrive. One of these regions is the high-valley lands of central Mexico, which has variable environments with specific traits that limit crop growth and development, such as short growing season, scarce and poorly distributed rainfall, and low temperature, so it is necessary to adapt the biological cycles of crops to these environmental conditions (Barrales *et al.*, 2002) and it is necessary to develop genotypes of wide adaptation and good yield to cope with these conditions.

Intervarietal crosses have been tested under conditions of small valleys, hillsides and not very steep slopes where yields are low and no improved varieties or conventional hybrids are planted; but they have similar or higher yields than in the study region (Palemón *et al.*, 2011). In the high-valley lands of Mexico area, the yield potential of yellow maize genotypes has been little studied. Tadeo *et al.* (2012), Espinosa-Calderón *et al.* (2013) and Martínez-Yañez *et al.* (2017) have determined the productive capacity of varietal hybrids and varieties; Hernández-Vázquez *et al.* (2018) evaluated agronomic performance and identified populations as a germplasm source for the development of genotypes with high yield potential.

In the aforementioned studies, intervarietal crosses are highlighted that equal or exceed the yields of the genotypes planted in the area. In regard to the varieties and varietal hybrids, they show good yield, only that the parents (varieties and lines) used are from the same study area. The evaluation and identification of populations is important, but it is necessary to introduce and use, as immediately as possible, the present genetic diversity for the development of higher yielding genotypes for variable environments.

Currently, the demand for yellow maize is not met, conventional hybrids do not thrive in variable environments. There is genetic diversity for use in varieties development,

and both the number and knowledge of genotypes adapted to diverse environments is limited. For this reason, more knowledge needs to be generated on responses of genotypes with a broad genetic base suitable for variable environments, precocious, resistant to biotic and abiotic factors, and with yield potential. One promising option is intervarietal crosses between improved varieties from different geographical areas, in order to take advantage of genetic diversity. Therefore, the objective of this research was to determine the yield potential of intervarietal crosses of yellow maize in environments of the high-valley lands in central Mexico, compared with conventional hybrids, open-pollinated varieties and their parental lines, adapted to the high-valley lands; as well as to determine the traits that influence yield. Under the hypothesis that intervarietal crosses are equal in yield to conventional hybrids.

MATERIALS AND METHODS

Experimental sites

The experiment was established in two locations; in Ayapango, State of Mexico (19° 08' 11" N and 98° 48' 30" O), at 2440 m with mean annual temperature of 14.2 °C and mean annual precipitation of 804.7 mm, and in the Experimental Fields of the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, State of Mexico (19° 27' 38" N and 98° 54' 11" O), at 2250 m with mean annual temperature of 15 °C and mean annual precipitation of 645 mm.

Plant material

A total of 71 genotypes were used; 56 yellow maize F_1 intervarietal crosses (C-1,... C-56); the parental lines Reynoso 1 (Prog-1, Synthetic Yellow II from eight parents, temperate climate), Noel 2 (Prog-2, Yellow "Toro Vandeño" race, warm climate), Castillo 4 (Prog-3, a population of the "Chalqueño" race, temperate climate), Noel 3 (Prog-4, "Ocotito" Synthetic Yellow "Cristalinos del Caribe" race, warm climate), Carrera 2 (Prog-5, Chapingo hybrid 622: [4A × 6A] × CML-486), of transitional climate), Reynoso 3 (Prog-6, Sintético Amarillo I from eight parents, temperate climate), Arahón 1 (Prog-7, population HQ-15 25# Sel. Pob. Ama., temperate climate) and AGil 1 (Prog-8, population Tlax-CP-15 CPue-215 Am. Ts., temperate climate); as controls, four white grain F_2 hybrids of HS-2 (Tes-1, Mont-18 99#), H-155 (Tes-2, temperate climate hybrid, from INIFAP), Cherokee (Tes-3, temperate climate hybrid, from Aspros®) and HS-2 (Tes-4, temperate climate hybrid, from Colegio de Postgraduados); and three temperate climate yellow maize open-pollinated varieties (OPV) Castillo 11 (Tes-5), Castillo 12 (Tes-6) and Castillo 13 (Tes-7). White-grained hybrids were chosen because of the absence of yellow-coloured hybrids for comparison with the intervarietal crosses.

Design and experimental unit

The experimental design used was randomized complete blocks with three replicates. The experimental unit consisted of two furrows 5 m long and 0.8 m wide. The distance

between plants was 0.5 m. Three seeds were sown per hole and after the thinning to two plants to obtain a density of 55 000 plants per ha.

Agronomic management

In Ayapango, sowing was done on April 28, 2020 under rainfed conditions. The fertilization dose used was 80-40-20 N-P-K with urea (46-00-00), diammonium phosphate (18-46-00) and potassium chloride (00-00-60) in a single application at 45 days after planting (das). At Montecillo, it was planted on May 14, 2020 under rainfed conditions with three relief irrigations during germination, emergence and flowering. The fertilization dose used was 160-80-00 N-P-K with urea (46-00-00) and diammonium phosphate (18-46-00), all the P and half of the N was applied at sowing and the rest of the N at 45 das. In both locations, wild plants control was carried out with an application of PRIMAGRAM® Gold herbicides in pre-emergence and MARVEL® in postemergence, at a rate of 3 L ha⁻¹ for each.

Variables evaluated

The variables evaluated were grouped into yield components and agronomic traits, which were measured on five plants, five ears and 10 grains from each ear. Yield components were ear diameter (DM in mm), ear length (LM in cm), number of ear rows (NH), total ear grain weight (PGM in g), 100-grain weight (P100G in g), grain thickness (EG in mm), grain length (LG in cm), grain width (AG in mm), shelling corn coefficient (CD) and grain yield (REN in Mg ha⁻¹). The agronomic traits were days to female flowering (DFF), floral asynchrony (AF), plant height (AP in cm), ear height (AM in cm) and prolificacy index (IP).

Statistical analysis

A combined analysis of variance across environments, a comparison of means among genotypes (Tukey, $p \leq 0.05$) and Pearson correlation coefficients between variables were calculated. All analyses were performed with the statistical package SAS® version 9.4 (SAS Institute Inc., 2014).

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of variance

Across all sources of variation there were statistical differences in most variables in maize genotypes. In the factor Environments there were differences in 10 variables, in the factor Genotypes in all variables and in the interaction genotype × environment (Gen × Env) in 13 variables (Table 1). These results indicate that there is wide diversity in yield components and agronomic traits, due to the effect of the environment, genotypes, their interaction and the use of divergent varieties as parents of intervarietal crosses. The use of genetic diversity allows to identify favourable alleles for genetic improvement (Barrera-Guzmán *et al.*, 2020; González-Martínez *et al.*, 2020); get to know alternative heterotic patterns (Carena, 2005), which can be exploited for the

Table 1. Mean squares of the combined analysis of variance and significance for agronomic traits and yield components in yellow maize (*Zea mays* L.) crosses, their parents and controls evaluated in two environments.

Variation factor	GL	AP [†]	AM [‡]	AF [§]	DFF ^ᵇ	IP [‡]	DM ^{††}	LM ^{‡‡}
Environments (Env)	1	207523.7**	128725.3**	48.3*	56396**	0.18NS	97.6NS	34.6NS
Blo/Env	4	1545.6**	1111.1**	2.2NS	57.6**	0.04**	15.1**	11.9**
Genotypes (Gen)	70	3305.4**	3479.8**	3.8**	324.3**	0.09**	25.6**	3.5**
Gen × Env	70	505.4**	359.5**	3.2**	34.5**	0.03**	7.5**	1.4*
Error	280	222.1	176.1	1.1	8.5	0.01	3.6	1.1
CV (%)		6.4	11.1	60.4	3.0	10.28	4.2	6.8
Variation factor	NH ^{§§}	PGM ^{ᵇᵇ}	P100G ^{ᵐᵐ}	EG ⁺⁺⁺	LG ^{‡‡‡}	AG ^{§§§}	CD ^{ᵇᵇᵇ}	REN ^{ᵐᵐᵐ}
Environment (Env)	51.1 **	33989.5*	170.6NS	0.00095*	0.092**	0.0001NS	0.0388*	82.2**
Blo/Env	0.2 NS	3426.1**	30.6*	0.00006NS	0.004NS	0.0008NS	0.0043**	2.1*
Genotypes (Gen)	8.1 **	2280.6**	116.6**	0.00393**	0.088**	0.0103**	0.0062**	6.1**
Gen × Env	1.1 **	898.7**	27.6**	0.00045NS	0.009**	0.0023**	0.0005NS	3.7**
Error	0.6	367.0	9.9	0.00042	0.003	0.0012	0.0006	0.6
CV (%)	5.5	14.3	10.3	5.00485	4.824	4.0501	2.9812	14.9

GL: degrees of freedom, [†]AP: plant height, [‡]AM: ear height, [§]AF: floral asynchrony, ^ᵇDFF: days to female flowering, [‡]IP: prolificacy index, ^{††}DM: ear diameter, ^{‡‡}LM: ear length, ^{§§}NH: number of ear rows, ^{ᵇᵇ}PGM: total grain weight of the ear, ^{ᵐᵐ}P100G: 100-grain weight, ⁺⁺⁺EG: grain thickness, ^{‡‡‡}LG: grain length, ^{§§§}AG: grain width, ^{ᵇᵇᵇ}CD: shelling corn coefficient, ^{ᵐᵐᵐ}REN: yield, Blo/Env: blocks nested in environments, Gen × Env: genotype × environment interaction, CV: coefficient of variation. NS: non-significant, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$.

development of varieties with higher productive potential and wider adaptation (Eze *et al.*, 2020; Velasco-García *et al.*, 2019).

Yield and yield components

The yield of 73.2 % of the intervarietal crosses evaluated was statistically equal to the controls and superior to the parents, but only the five crosses with higher yield are shown (Table 2). The C-14 cross out-yielded Prog-5 by 187 %, Tes-5 by 53 % and MG by 31 %. The intervarietal crosses show yield potential, due to the similarity with the controls and the marked differences with the parents and with MG.

Conventional hybrids are generally superior in yield compared to other types of unimproved genotypes (Pixley, 2006; Duvick, 2005; Carena, 2005); however, the results of the present study do not agree with the theory. The yield of the intervarietal crosses was statistically equal to the controls, ranging from 5.15 to 7.09 Mg ha⁻¹ and was equal to that of conventional hybrids, one OPV and it was superior to all parents. Different genotypes have been found to match or outperform hybrids, such as divergent population hybrids (Carena, 2005); improved OPV (Espinosa-Calderón *et al.*, 2013); non-conventional hybrids and OPV (Martínez-Yañez *et al.*, 2017); crosses between maize races (Velasco-García *et al.*, 2019); population hybrids (Eze *et al.*, 2020); experimental single hybrids (Cieza *et al.*, 2020). Furthermore, the use of divergent parents tends to increase yield (Moll *et al.*, 1965).

Table 2. Yield and yield components of outstanding yellow corn (*Zea mays* L.) crosses evaluated in two environments compared to their parents and controls.

Genotypes	DM [†] (mm)	LM [‡] (cm)	NH [§]	PGM [‡] (g)	P100G [‡] (g)	EG ^{††} (mm)	LG ^{‡‡} (cm)	AG ^{§§} (mm)	CD ^{‡‡}	REN ^{‡‡‡} (Mg ha ⁻¹)
C-14	46.9 a	16.0 a	13.1 c	157.5 a	37.4 a	0.40 b	1.41 a	0.91 a	0.85 a	7.09 a
C-51	46.8 b	15.3 a	13.4 c	151.3 a	35.8 a	0.39 b	1.40 a	0.90 a	0.88 a	7.07 a
C-28	45.7 b	15.8 a	13.9 b	149.5 a	34.3 b	0.41 b	1.32 b	0.89 a	0.86 a	7.06 a
C-35	47.2 a	15.5 a	16.3 a	157.8 a	32.9 b	0.41 b	1.33 b	0.83 b	0.87 a	7.05 a
C-8	46.8 a	15.9 a	14.0 b	144.2 a	30.1 b	0.4 b	1.25 b	0.89 a	0.83 b	6.88 a
Prog-1	44.4 b	15.5 a	14.8 b	121.9 b	28.6 b	0.42 b	1.15 c	0.83 b	0.80 b	4.75 b
Prog-2	43.9 b	13.8 b	13.1 c	78.4 c	22.8 c	0.40 b	1.13 c	0.87 b	0.79 b	2.92 c
Prog-3	38.4 c	13.9 b	12.4 c	97.5 b	26.3 c	0.36 c	1.30 b	0.76 c	0.89 a	3.72 b
Prog-4	41.3 c	14.1 b	13.4 c	84.2 b	22.6 c	0.41 b	1.03 d	0.85 b	0.77 c	3.00 c
Prog-5	43.3 b	12.1 b	16.7 a	70.4 c	18.9 d	0.42 b	0.95 d	0.76 c	0.77 c	2.47 c
Prog-6	42.6 b	15.3 a	14.8 b	108.0 b	27.8 b	0.45 a	1.10 c	0.83 b	0.82 b	3.69 b
Prog-7	46.1 b	15.6 a	13.8 b	130.1 a	32.8 b	0.42 b	1.24 b	0.91 a	0.83 b	4.89 b
Prog-8	45.4 b	13.8 b	13.9 b	130.2 a	34.2 b	0.40 b	1.45 a	0.83 b	0.88 a	4.19 b
Tes-1	46.0 b	14.6 a	16.3 a	148.1 a	31.3 b	0.41 b	1.37 a	0.80 b	0.87 a	6.04 a
Tes-2	46.1 b	14.6 a	16.4 a	124.1 b	24.4 c	0.38 b	1.21 b	0.82 b	0.84 a	6.74 a
Tes-3	45.9 b	15.6 a	14.8 b	144.2 a	34.5 b	0.45 a	1.31 b	0.86 b	0.83 b	6.13 a
Tes-4	46.9 a	15.0 a	16.2 a	157.5 a	33.0 b	0.41 b	1.40 a	0.82 b	0.88 a	7.01 a
Tes-5	48.4 a	15.3 a	14.2 b	156.9 a	41.1 a	0.45 a	1.47 a	0.90 a	0.85 a	4.62 b
Tes-6	51.3 a	16.4 a	16.6 a	174.6 a	36.6 a	0.43 a	1.43 a	0.87 b	0.83 b	5.75 a
Tes-7	48.7 a	15.3 a	13.9 b	148.3 a	42.4 a	0.47 a	1.48 a	0.91 a	0.85 a	4.75 b
MG	45.3	15.5	14.4	133.3	30.5	0.41	1.30	0.86	0.84	5.40

[†]DM: ear diameter, [‡]LM: ear length, [§]NH: number of ear rows, [‡]PGM: total ear grain weight, [‡]P100G: 100-grain weight, ^{††}EG: grain thickness, ^{‡‡}LG: grain length, ^{§§}AG: grain width, ^{‡‡}CD: shelling corn coefficient, ^{‡‡‡}REN: yield, C: crosses, Prog: parents, Tes: controls, MG: overall mean. Means with different letters in the same column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

The yield of the intervarietal crosses indicated that they have potential compared to conventional hybrids, due to the use of divergent parents, which favour the expression of traits that influence higher yield, such as agronomic traits and yield components. Yield is a quantitative trait and is influenced by the joint expression of different yield components, although the expression of the components varies according to the constitution of the genotype. In the C-14 cross, 77.77 % of the components were expressed, 88.89 % in the controls and 33.33 % in the parents. The yield components with the highest expression in the genotypes evaluated were LM, PGM and CD, which positively and differentially influenced yield (Table 2). Different components are expressed, the most important of which are LM, DM, 200-grain weight, NH and the number of grains per row (Velasco-García *et al.*, 2019); the number of grains, speed and duration of grain filling period (Zhang *et al.*, 2019); DM, LM, NH (López-Morales *et al.*, 2020); LM, DM, NH and number of grains per row (Santiago-López *et al.*, 2020). In yellow maize they are LM, NH, grains per row and grains per ear (Espinosa-Calderón *et al.*, 2013); CD, NH, ear weight, PGM, LG, AG and number of grains per

row (Chura and Tejeda, 2014). Results in this study indicated that all the evaluated yield components had an influence on yield and coincided with those reported by different authors, but in the crosses the most important were DM, LM, PGM, P100G, LG, AG and CD, which translates into large ears and grains, higher proportion of grains per ear and, therefore, higher yield.

Agronomic performance

Agronomic traits, like yield components, positively and differentially influenced higher yield expression, although trait expression varied by genotype. In the C-14 and C-51 crosses, 80 % of the agronomic traits were expressed and 60 % in the controls and parents. The agronomic traits with the highest expression in the genotypes were AP, AF and IP (Table 3). Traits expressed vary, such as spike reduction, more erect leaves, fewer tillers and lower protein percentage (Duvick, 2005); tassel size and tassel branch number (Nardino *et al.*, 2016); days to male flowering and DFF (López-Morales *et al.*, 2020). In yellow maize, days to male flowering, DFF, leaf insertion angle and IP (Chura

Table 3. Agronomic performance of outstanding yellow maize (*Zea mays* L.) crosses evaluated in two environments compared to their parents and controls.

Genotypes	AP [†] (cm)	AM [‡] (cm)	DFF [§]	AF ^b	IP [•]	REN ^{††} (Mg ha ⁻¹)
C-14	253.2 a	150.6 a	93.8 d	3.3 a	1.22 a	7.09 a
C-51	258.1 a	148.7 a	93.3 d	1.8 a	1.16 a	7.07 a
C-28	246.3 a	140.8 b	97.8 c	1.1 b	1.30 a	7.06 a
C-35	230.4 b	126.9 b	93.3 d	1.0 b	1.06 b	7.05 a
C-8	243.9 b	137.0 b	99.6 c	2.0 a	1.25 a	6.88 a
Prog-1	219.0 b	99.8 c	90.6 d	1.5 a	1.10 b	4.75 b
Prog-2	230.1 b	136.9 b	110.0 b	1.8 a	0.99 b	2.92 c
Prog-3	267.2 a	158.4 a	99.3 c	3.0 a	0.90 b	3.72 b
Prog-4	188.4 c	95.9 c	114.0 a	1.6 a	1.14 b	3.00 c
Prog-5	180.3 c	91.0 c	118.0 a	2.1 a	0.94 b	2.47 c
Prog-6	186.3 c	74.1 d	88.8 e	1.5 a	0.97 b	3.69 b
Prog-7	215.3 b	100.5 c	91.5 d	2.5 a	1.04 b	4.89 b
Prog-8	239.8 b	135.7 b	90.6 d	3.6 a	0.81 c	4.19 b
Tes-1	240.5 b	125.7 b	93.1 d	2.0 a	1.20 a	6.04 a
Tes-2	221.7 b	120.1 b	107.0 b	0.1 b	1.42 a	6.74 a
Tes-3	206.7 c	90.7 c	87.0 e	0.0 b	1.19 a	6.13 a
Tes-4	254.9 a	134.1 b	96.0 d	1.6 a	1.36 a	7.01 a
Tes-5	282.2 a	178.5 a	100.0 c	3.8 a	0.77 c	4.62 b
Tes-6	266.1 a	141.8 b	103.0 c	3.3 a	0.88 c	5.75 a
Tes-7	279.5 a	173.2 a	98.1 c	4.0 a	0.75 c	4.75 b
MG	229.3	119.3	97.1	1.7	1.08	5.40

[†]AP: plant height, [‡]AM: ear height, [§]DFF: days to female flowering, ^bAF: floral asynchrony, [•]IP: prolificacy index, ^{††}REN: yield, C: crosses, Prog: parents, Tes: controls, MG: overall mean. Means with different letters in the same column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

and Tejada, 2014); days to male flowering, DFF, AP and AM (Espinosa-Calderón *et al.*, 2013). Results in this study indicated that all the agronomic traits evaluated influenced a greater expression of yield and agree with those reported by other authors, but in the evaluated crosses the most important traits were AP, AM, AF and IP, which translate into larger and more productive plants. Furthermore, they had low DFF values, indicating that they are precocious; this represents an advantage in the decrease of the biological cycle due to the presence of early frosts, late frosts and low temperatures in the study area.

Genotype × Environment interaction on yield

The yield of 23 crosses was statistically equal in both locations, in five parents and two controls, indicating there was no genotype × environment interaction. The yield of the five best crosses was consistent because it did not change from one environment to another (Table 4). Overall, the crosses and parents yielded more in Montecillo and the open-pollinated controls and the hybrid Tes-1 and Tes-4 in Ayapango, while Tes-2 and Tes-3 decreased their yield. Yield behaviour was different for each genotype and

Table 4. Yield performance of outstanding yellow maize (*Zea mays* L.) crosses evaluated in two environments compared to their parents and controls.

Genotypes	Yield (Mg ha ⁻¹)	
	Montecillo	Ayapango
C-14	7.10 a	7.08 a
C-51	7.06 a	7.09 a
C-28	7.21 a	6.92 a
C-35	7.99 a	6.11 a
C-8	7.65 a	6.11 a
Prog-1	5.16 b	4.33 b
Prog-2	3.91 b	1.93 c
Prog-3	3.07 b	4.38 b
Prog-4	3.61 b	2.39 c
Prog-5	3.69 b	1.25 c
Prog-6	4.25 b	3.14 b
Prog-7	5.28 b	4.50 b
Prog-8	3.40 b	4.98 b
Tes-1	6.57 a	5.51 a
Tes-2	8.52 a	4.97 b
Tes-3	7.15 a	5.11 b
Tes-4	7.59 a	6.44 a
Tes-5	3.09 b	6.14 a
Tes-6	4.52 b	6.98 a
Tes-7	2.30 c	7.20 a

C: crosses, Prog: parents, Tes: controls. Means with different letters in the same row are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

environment individually, but it was not so for the crosses, which proves that they have wide adaptation and yield stability.

The genotype × environment interaction effect on yield stability of genotypes was different, due to the lack of adaptation to the environments evaluated. It varies by the diverse environmental conditions in which they develop; however, stable genotypes have been found as experimental single crosses (Sánchez-Ramírez *et al.*, 216); hybrids (Alí *et al.*, 2017) and population hybrids (Eze *et al.*, 2020). Results in this study indicated that 23 crosses had consistent yields and can be grown in both evaluated locations, which may be attributed to a greater genetic variability that allowed them to ameliorate the effects of the environment, without causing drastic changes in yield, since their parents are divergent. For this reason, it may be assumed that they are widely adapted and have yield stability, that can be used immediately as a first approach to obtain improved genotypes, while genetic improvement is conducted towards obtaining hybrids with a higher level of inbreeding that exceed the yield potentials shown here by the intervarietal crosses.

Correlations

Statistical differences were found in most of the combinations of variables. Positive correlation was observed between REN and DM, LM, NH, PGM, P100G, LG, AG, CD and with all agronomic traits (Table 5). Positive correlations indicate a direct relationship and the higher the correlation, the stronger the association between the variables. The opposite happened with negative correlations, which are associated

Table 5. Pearson correlation coefficients between yield, yield components and agronomic traits in maize (*Zea mays* L.) genotypes.

	AP [†]	AM [‡]	DFF [§]	AF [‡]	CD [¶]	IP ^{††}	DM ^{‡‡}	LM ^{§§}	NH ^{‡‡}	PGM ^{¶¶}	P100G ^{†††}	EG ^{¶¶¶}	LG ^{§§§}	AG ^{‡‡‡}
AM	0.94**													
DFF	-0.55**	-0.40**												
AF	0.03NS	0.09NS	0.25**											
CD	0.54**	0.51**	-0.40**	0.07NS										
IP	0.12NS	0.06NS	-0.10NS	-0.35**	0.07NS									
DM	0.15**	0.09NS	-0.23**	-0.10NS	-0.01NS	0.06NS								
LM	0.18**	0.08NS	-0.33**	-0.23**	0.11NS	0.15**	0.48**							
NH	-0.04NS	-0.12NS	-0.14**	-0.18**	-0.16**	0.10*	0.43**	0.12**						
PGM	0.42**	0.32**	-0.49**	-0.13**	0.46**	0.17**	0.74**	0.72**	0.25**					
P100G	0.36**	0.29**	-0.41**	0.07NS	0.42**	-0.06NS	0.61**	0.43**	-0.14**	0.76**				
EG	-0.26**	-0.31**	-0.07NS	-0.01NS	-0.34**	-0.19**	0.38**	0.22**	0.28**	0.15**	0.33**			
LG	0.56**	0.54**	-0.34**	0.14**	0.71**	-0.03NS	0.38**	0.22**	-0.14**	0.68**	0.75**	-0.17**		
AG	0.04NS	0.03NS	-0.07NS	-0.05NS	-0.07NS	0.03NS	0.46**	0.35**	-0.42**	0.32**	0.57**	0.24**	0.20**	
REN	0.44**	0.31**	-0.46**	-0.31**	0.39**	0.64**	0.43**	0.41**	0.16**	0.66**	0.47**	-0.05NS	0.43**	0.21**

[†]AP: plant height, [‡]AM: ear height, [§]DFF: days to female flowering, [‡]AF: floral asynchrony, [¶]CD: shelling corn coefficient, ^{††}IP: prolificacy index, ^{‡‡}DM: ear diameter, ^{§§}LM: ear length, ^{‡‡}NH: number of rows, ^{¶¶}PGM: total grain weight of ear, ^{†††}P100G: weight of 100 grains, ^{¶¶¶}EG: grain thickness, ^{§§§}LG: grain length, ^{‡‡‡}AG: grain width, ^{¶¶¶}REN: yield. NS: not significant, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$.

in the opposite direction. Variables positively associated with yield are grain weight and grains per ear (Milander *et al.*, 2016); chlorophyll content, ears per plant, NH, total dry matter and DM (Ali *et al.*, 2017); leaf area index, chlorophyll content and net photosynthesis (Zhang *et al.*, 2018); IP, LM, DM and grains per ear row (Velasco-García *et al.*, 2019); number of grains (Ruiz *et al.*, 2019); ear weight and grain weight (Cieza *et al.*, 2020). Similarly, negative associations have been found such as grain protein concentration (Butts-Wilmsmeyer *et al.*, 2019). All the variables evaluated are associated with yield and coincide with that reported by those authors. The variables with the highest association with REN were PGM ($r = 0.66$), P100G ($r = 0.47$), LG ($r = 0.43$), IP ($r = 0.64$) and AP ($r = 0.44$), the higher the values of these in the genotypes, the higher the yield. The variables with negative correlations with REN were DFF ($r = -0.46$) and AF ($r = -0.31$), the higher their values, the lower the yield, because there shall be no synchronization with male flowering. Therefore, traits are differentially associated with yield and between traits.

This research highlights the yield potential of the intervarietal crosses, as they statistically yielded the same as the controls and outperformed their parents. Yield was due to the joint and differentiated expression of yield components and agronomic traits, resulting in large plants with good ear and grain characteristics, and precocious. Furthermore, in the crosses where there was no Gen \times Env interaction, they may be assumed to be widely adapted and have stability in yield. For this reason, the development and use of intervarietal crosses as an improved variety to increase yield and production of yellow maize in variable environments is promising.

Another advantage is that seed production is easy and not expensive. The main limitation is that there is no certified seed production of this type of improved plant material. Therefore, it is necessary to join multidisciplinary efforts between institutions and public policies that support the development and promotion of this technology for unfavourable conditions. It is also advisable to evaluate in environments other than those studied, in order to corroborate the outstanding traits of the intervarietal crosses and to generate more knowledge of yield potential in wider sets of conditions.

CONCLUSIONS

The intervarietal crosses have yield potential compared to conventional hybrids (7.09 *vs.* 7.01 Mg ha⁻¹). The characteristics of ear, grain, plant height and prolificacy index had the greatest influence on yield expression. For this reason, intervarietal crosses represent a viable alternative to increase yield and production of yellow maize in variable environments.

REFERENCES

- Ali F, Ahsan M, Ali Q, Kanwal N. 2017. Phenotypic stability of *Zea mays* grain yield and its attributing traits under drought stress. *Frontiers in Plant Science* 8: 1397. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01397>
- Barrales DJS, Livera MM, González HVA, Peña VC, Kohashi-Shibata J, Castillo GF. 2002. Relaciones térmicas en el sistema suelo-planta-atmósfera durante la incidencia del fenómeno de enfriamiento o helada. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25 (3): 289–297.

- Barrera-Guzmán LA, Legaria-Solano JP, Ortega-Paczka R. 2020. Diversidad genética en poblaciones de razas mexicanas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (1): 121–125. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.121>
- Butts-Wilmsmeyer CJ, Seebauer JR, Singleton L, Below FE. 2019. Weather during key growth stages explains grain quality and yield of maize. *Agronomy* 9 (1): 16. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010016>
- Carena MJ. 2005. Maize commercial hybrids compared to improved population hybrids for grain yield and agronomic performance. *Euphytica* 141: 201–208. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-7072-0>
- Chura CJ, Tejeda SJ. 2014. Comportamiento de híbridos de maíz amarillo duro en la localidad de La Molina, Perú. *Idesia (Arica)* 32 (1): 113–118. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292014000100014>
- Cieza RL, Jara CTW, Terrones MR, Figueroa CYC, Valdera CA. 2020. Características agronómicas, componentes de producción y rendimiento de grano de híbridos de maíz (*Zea mays*). *Manglar* 17 (3): 261–267. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.038>
- Duvick DN. 2005. Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.). *Maydica* 50: 193–202.
- Espinosa-Calderón A, Tadeo-Robledo M, Turrent-Fernández A, Sierra-Macías M, Gómez-Montiel N, Zamudio-González B. 2013. Rendimiento de variedades precoces de maíz grano amarillo para Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 24 (1): 93–99.
- Eze CE, Akinwale RO, Michel S, Bürstmayr H. 2020. Grain yield and stability of tropical maize hybrids developed from elite cultivars in contrasting environments under a rainforest agroecology. *Euphytica* 216: 89. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02620-y>
- Freshley D, Delgado-Serrano MM. 2020. Learning from the past in the transition to open-pollinated varieties. *Sustainability* 12 (11): 4716. <https://doi.org/10.3390/su12114716>
- García-Salazar JA, Guzmán-Soria E. 2015. Factores que afectan la demanda de semilla mejorada de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38 (3): 319–327.
- González-Martínez J, Rocandio-Rodríguez M, Contreras-Toledo AR, Joaquín-Cancino S, Vanoye-Eligio V, Chacón-Hernández JC, Hernández-Bautista A. 2020. Diversidad morfológica y agronómica de maíces nativos del Altiplano de Tamaulipas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (4): 361–370. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4.361>
- Hernández-Vázquez B, Mendoza-Castillo MC, Castillo-González F, Pecina-Martínez JA, Delgado-Alvarado A, Lobato-Ortiz R, García-Zavala JJ. 2018. Valoración agromorfológica de germoplasma de maíz amarillo en Valles Altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41 (4): 393–402. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4.393-402>
- López-Morales F, García-Zavala JJ, Corona-Torres T, Cruz-Izquierdo S, López-Romero G, Reyes-López D, Vásquez-Carrillo MG, Molina-Galán JD. 2020. Comparación del rendimiento y cambios morfológicos en maíz Tuxpeño V-520C adaptado a Valles Altos en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (2): 133–141. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.133>
- Martínez-Yáñez B, Tadeo-Robledo M, Benítez-Riquelme I, Vázquez-Carrillo G, Espinosa-Calderón A, Mejía-Contreras JA, López-López C, Martínez-Díaz F. 2017. Productividad de híbridos no convencionales de maíz de endospermo amarillo para Valles Altos de México. *Agrociencia* 51 (6): 635–647.
- Milander JJ, Jukic Z, Mason SC, Glausha T, Kmail Z. 2016. Plant population influence on maize yield components in Croatia and Nebraska. *Crop Science* 56 (5): 2742–2750. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.09.0565>
- Moll RH, Lonnquist JH, Vélez FJ, Johnson EC. 1965. The relationship of heterosis and genetic divergence in maize. *Genetics* 52 (1): 139–144. <https://doi.org/10.1093/genetics/52.1.139>
- Muñoz OA, Miranda CS, Cuevas SJA, Santacruz VA, Sánchez DS. 2009. Resistencias, Prehistoria, Historia y Diferencias de Teocintle a Maíz. *Impresos América, Texcoco, Estado de México, México*, pp: 7–32.
- Nardino M, de Souza VQ, Baretta D, Konflanz VA, Carvalho IR, Follmann DN, Caron BO. 2016. Association of secondary traits with yield in maize F₁'s. *Ciência Rural* 46 (5): 776–782. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20150253>

- Palemón AF, Gómez MNO, Castillo GF, Ramírez VP, Molina GJD, Miranda CS. 2011. Cruzas intervarietales de maíz para la región semicálida de Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2 (5): 745–757.
- Pixley KV. 2006. Hybrid and open-pollinated varieties in modern agriculture. *In: Plant Breeding: The Arnel R. Hallauer International Symposium*. Lamkey KR, Lee M (eds.); Blackwell Publishing: Ames, IA, USA, pp: 234–250. <https://doi.org/10.1002/9780470752708.ch17>
- Ruiz MB, D’Andrea KE, Otegui ME. 2019. Phenotypic plasticity of maize grain yield and related secondary traits: differences between inbreds and hybrids in response to contrasting water and nitrogen regimes. *Field Crops Research* 239: 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.004>
- Sánchez-Ramírez FJ, Mendoza-Castillo MC, Mendoza-Mendoza CG. 2016. Estabilidad fenotípica de cruzas simples e híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 39 (3): 269–275. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.3.269-275>
- Santiago-López N, García-Zavala JJ, Espinoza-Banda A, Santiago-López U, Esquivel-Esquivel G, Molina-Galán JD. 2020. Adaptación de maíz Tuxpeño a Valles Altos de México mediante selección masal. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (3): 259–265. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.3.259>
- SAS (Statistical Analysis System) Institute Inc. 2013. Base SAS® 9.4 procedures guide. High-performance procedures. Second edition. SAS Institute Inc, Cary, NC, USA. 568 p.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2021. Expectativas agroalimentarias 2021. Abril 2021. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Agricultura-SIAP. Ciudad de México, México. 60 p. <https://www.gob.mx/siap/documentos/expectativas-de-produccion-agropecuaria-pesquera-2021> (Retrieved: July 2021).
- Tadeo RM, Espinosa CA, Arteaga EI, Trejo PV, Sierra MM, Valdivia BR, Zamudio GB. 2012. Productividad de variedades precoces de maíz de grano amarillo para Valles Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3 (7): 1417–1423. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1347>
- Velasco-García AM, García-Zavala JJ, Sahagún-Castellanos J, Lobato-Ortiz R, Sánchez-Abarca C, Marín-Montes IM. 2019. Rendimiento, componentes de rendimiento y heterosis de germoplasma de maíz adaptado a Valles Altos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42 (4): 367–374. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.367>
- Zhang H, Han M, Comas LH, DeJonge KC, Gleason SM, Trout TJ, Ma L. 2019. Response of maize yield components to growth stage-based deficit irrigation. *Agronomy Journal* 111 (6): 3244–3252. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0214>
- Zhang L, Liu H, Sun J, Li J, Song Y. 2018. Seedling characteristics and grain yield of maize grown under straw retention affected by sowing irrigation and splitting nitrogen use. *Field Crops Research* 225: 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.016>

CRUZAS INTERVARIETALES, ALTERNATIVA PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ (*Zea mays* L.) AMARILLO EN AMBIENTES VARIABLES

Roberto de la Cruz Díaz-Juárez¹, Amalio Santacruz-Varela^{1*}, Fernando Castillo-González¹, Noel Orlando Gómez-Montiel², J. Jesús García-Zavala¹, Abel Muñoz-Orozco^{1†}

¹ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Iguala. Carretera Iguala-Tuxpan km 2.5, Iguala de la Independencia, Guerrero, México. C. P. 40000.

* Autor para correspondencia: asvarela@colpos.mx

RESUMEN

En México, el maíz (*Zea mays* L.) se cultiva en condiciones de temporal y en infinidad de ambientes variables que limitan la producción. Para hacer frente a estas adversidades se han generado genotipos de diferente constitución genética, como las cruzas intervarietales; sin embargo, el conocimiento del potencial de rendimiento de estas cruzas en ambientes variables es limitado. El objetivo del estudio fue determinar el potencial de rendimiento de cruzas intervarietales de maíz amarillo en ambientes de los valles altos del centro de México, así como los componentes que influyen en el rendimiento bajo la hipótesis de que las cruzas intervarietales igualan en rendimiento a los híbridos convencionales. Se evaluaron las cruzas, las variedades de polinización libre progenitoras y los testigos comerciales en un diseño de bloques completos al azar. Se midieron 15 variables agronómicas y componentes de rendimiento. Se realizó un análisis de varianza combinado, una comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) y se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson. El análisis de varianza detectó diferencias estadísticas en todos los factores de variación en la mayoría de las variables evaluadas. Las cruzas intervarietales tuvieron rendimiento estadísticamente igual al de los testigos y superior a los progenitores. Las cruzas destacaron en diámetro y longitud de mazorca, peso total de granos de la mazorca, peso de 100 granos, largo y ancho de grano, altura de planta y mazorca, coeficiente de desgrane e índice de prolificidad. En 23 cruzas no fue significativo el efecto de interacción genotipo \times ambiente. Las cruzas intervarietales tienen potencial de rendimiento comparado con híbridos convencionales. Los caracteres de mazorca y grano son los que más influyeron en el rendimiento. Las cruzas intervarietales representan una alternativa para aumentar el rendimiento y la producción de maíz amarillo en los valles altos del centro de México.

Palabras clave: *Zea mays* L., rendimiento, componentes de rendimiento, características agronómicas, interacción genotipo \times ambiente.

Citation: Díaz-Juárez RC, Santacruz-Varela A, Castillo-González F, Gómez-Montiel NO, García-Zavala JJ, Muñoz-Orozco A. 2022. Cruzas intervarietales, alternativa para aumentar la producción de maíz (*Zea mays* L.) amarillo en ambientes variables.

Agrociencia. 56(7): 1278-1302. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2603>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: May 04, 2022.
Approved: September 30, 2022.
Published in Agrociencia:
November 29, 2022.

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



INTRODUCCIÓN

En México, el maíz (*Zea mays* L.) amarillo se usa en el sector pecuario e industrial, principalmente; pero el volumen producido de este maíz no satisface la demanda nacional y se importa alrededor del 70 % (SIAP, 2021). Por lo tanto es necesario aumentar la producción; ya sea por incremento en la superficie cultivada o aumento del rendimiento por unidad de superficie. Se puede obtener mayor rendimiento con mejoras en el manejo agronómico o con el desarrollo de genotipos por fitomejoramiento (Duvick, 2005). Los programas de mejora genética han permitido el desarrollo de genotipos mejorados de maíz, como variedades de polinización libre (VPL) locales/tradicionales e híbridos. En cuanto a híbridos, se pueden desarrollar híbridos convencionales y no convencionales, como los mestizos y las cruza intervarietales.

En México, el uso de híbridos convencionales no se ha adoptado en gran escala por diversos factores, como el costo elevado de adquisición de la semilla (García-Salazar y Guzmán-Soria, 2015). Se desarrollan para áreas planas y tierras agrícolas fértiles (Freshley y Delgado-Serrano, 2020), falta de infraestructura, alta demanda de insumos y falta de adaptación a los diversos ambientes (Pixley, 2006; García-Salazar y Guzmán-Soria, 2015). Además, existen condiciones diversas de clima, orografía accidentada y tipos de suelos que crean una mega diversidad de ambientes, micro regiones y nichos ecológicos (Muñoz *et al.*, 2009), condiciones en que los híbridos convencionales no prosperan. Una de estas regiones, es la de los valles altos de México, la cual tiene ambientes variables con características específicas que limitan el crecimiento y desarrollo de los cultivos, tales como estación de crecimiento corta, precipitación escasa y mal distribuida, y temperatura baja, entonces es necesario adaptar los ciclos biológicos de los cultivos a estas condiciones ambientales (Barrales *et al.*, 2002) y se necesita desarrollar genotipos de amplia adaptación y de buen rendimiento para hacer frente a dichas condiciones.

Las cruza intervarietales se han probado bajo condiciones de pequeños valles, lomeríos y laderas no muy pronunciadas donde el rendimiento es bajo y no se siembran variedades mejoradas o híbridos convencionales, y tienen rendimientos similares o superiores al de la región de estudio (Palemón *et al.*, 2011). En la zona de valles altos de México se ha estudiado poco el potencial de rendimiento de genotipos de maíz amarillo. Tadeo *et al.* (2012), Espinosa-Calderón *et al.* (2013) y Martínez-Yañez *et al.* (2017) han determinado la capacidad productiva de variedades e híbridos varietales y Hernández-Vázquez *et al.* (2018) evaluaron el comportamiento agronómico e identificaron poblaciones como fuente de germoplasma para el desarrollo de genotipos de alto potencial de rendimiento.

En los estudios mencionados, destacan las cruza intervarietales que igualan o superan en rendimiento a los genotipos sembrados en la zona. En cuanto a las variedades e híbridos varietales muestran buen rendimiento, solo que los progenitores (variedades y líneas) utilizados son de la misma zona de estudio y la evaluación e identificación de poblaciones es importante, pero se necesita introducir y usar de manera inmediata la diversidad genética existente para el desarrollo de genotipos de mayor rendimiento para ambientes variables.

En la actualidad, no se satisface la demanda de maíz amarillo, los híbridos convencionales no prosperan en ambientes variables. Existe diversidad genética para usarse en el desarrollo de variedades y tanto el número como el conocimiento de genotipos adaptados a ambientes diversos es limitado. Por tal motivo, hace falta generar más conocimiento sobre respuestas de genotipos de amplia base genética aptos para ambientes variables, precoces, resistentes a factores bióticos y abióticos, y con potencial de rendimiento. Una opción promisoriosa son las cruzas intervarietales entre variedades mejoradas de diferentes zonas geográficas, con el propósito de aprovechar la diversidad genética. Por lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo determinar el potencial de rendimiento de cruzas intervarietales de maíz amarillo en ambientes de los valles altos del centro de México, comparado con híbridos convencionales, variedades de polinización libre y sus progenitoras, adaptadas a los valles altos; así como determinar las características que influyen en el rendimiento. Bajo la hipótesis de que las cruzas intervarietales igualan en rendimiento a los híbridos convencionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

El experimento se estableció en dos localidades; en Ayapango, Estado de México (19° 08' 11'' N y 98° 48' 30'' O), a 2440 m con temperatura media anual de 14.2 °C y precipitación media anual de 804.7 mm, y en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, Estado de México (19° 27' 38'' N y 98° 54' 11'' O), a 2250 m con temperatura media anual de 15 °C y una precipitación media anual de 645 mm.

Material vegetal

Los genotipos utilizados fueron 71; 56 cruza intervarietales F_1 de maíz amarillo (C-1, ..., C-56); los progenitores Reynoso 1 (Prog-1, Sintético Amarillo II de ocho progenitores, de clima templado), Noel 2 (Prog-2, Amarillo raza Toro Vandeño, de clima cálido), Castillo 4 (Prog-3, población de la raza Chalqueño, de clima templado), Noel 3 (Prog-4, Sintético Amarillo Ocotito Raza Cristalinos del Caribe, de clima cálido), Carrera 2 (Prog-5, híbrido Chapingo 622: [4A × 6A] × CML-486), de clima de transición), Reynoso 3 (Prog-6, Sintético Amarillo I de ocho progenitores, de clima templado), Arahón 1 (Prog-7, población HQ-15 25# Sel. Pob. Ama., de clima templado) y AGil 1 (Prog-8, población Tlax-CP-15 CPue-215 Am. Ts., de clima templado); como testigos cuatro híbridos de grano blanco F_2 de HS-2 (Tes-1, Mont-18 99#), H-155 (Tes-2, híbrido de clima templado, del INIFAP), Cherokee (Tes-3, híbrido de clima templado, de Aspros®) y HS-2 (Tes-4, híbrido de clima templado, del Colegio de Postgraduados); y tres variedades de polinización libre (VPL) de maíz amarillo de clima templado Castillo 11 (Tes-5), Castillo 12 (Tes-6) y Castillo 13 (Tes-7). Se eligieron híbridos de grano blanco por la ausencia de híbridos de color amarillo para comparar a las cruza intervarietales.

Diseño y unidad experimental

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue de dos surcos de 5 m de largo y 0.8 m de ancho. La distancia entre plantas fue de 0.5 m. Se sembraron tres semillas por golpe y de ellas se dejaron crecer dos plantas para obtener una densidad de 55 000 plantas por ha.

Manejo agronómico

En Ayapango, la siembra se realizó el 28 de abril del 2020 en condiciones de temporal. La dosis de fertilización utilizada fue de 80-40-20 de N-P-K con urea (46-00-00), fosfato diamónico (18-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60) en una sola aplicación a los 45 días después de la siembra (dds). En Montecillo se sembró el 14 de mayo del 2020 en condiciones de temporal con tres riegos de auxilio en la germinación, emergencia y floración. La dosis de fertilización utilizada fue de 160-80-00 de N-P-K con urea (46-00-00) y fosfato diamónico (18-46-00), se aplicó todo el P y la mitad del N en la siembra y el resto del N a los 45 dds. En ambas localidades, el control de arvenses se realizó con una aplicación de los herbicidas PRIMAGRAM® Gold en preemergencia y MARVEL® en postemergencia, con una dosis de 3 L ha⁻¹ para cada uno.

Variables evaluadas

Las variables evaluadas se agruparon en componentes del rendimiento y características agronómicas, los cuales se midieron en cinco plantas, cinco mazorcas y 10 granos de cada mazorca. Los componentes del rendimiento fueron diámetro de mazorca (DM en mm), longitud de mazorca (LM en cm), número de hileras (NH), peso total de granos de la mazorca (PGM en g), peso de 100 granos (P100G en g), espesor del grano (EG en mm), largo del grano (LG en cm), ancho del grano (AG en mm), coeficiente de desgrane (CD) y el rendimiento de grano (REN en Mg ha⁻¹). Los caracteres agronómicos fueron días a floración femenina (DFF), asincronía floral (AF), altura de planta (AP en cm), altura de mazorca (AM en cm) e índice de prolificidad (IP).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza combinado a través de ambientes, una comparación de medias entre los genotipos (Tukey, $p \leq 0.05$) y se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables. Todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS® versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

En todas las fuentes de variación hubo diferencias estadísticas en la mayoría de las variables en los genotipos de maíz. En el factor Ambientes hubo diferencias en 10 variables, en el factor Genotipos en todas las variables y en la interacción genotipo × ambiente (Gen × Amb) en 13 variables (Cuadro 1). Estos resultados indican que existe amplia diversidad en los componentes de rendimiento y en las características agro-

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado y su significancia para características agronómicas y componentes del rendimiento en cruzas de maíz (*Zea mays* L.) amarillo, sus progenitores y los testigos evaluados en dos ambientes.

Factor de variación	GL	AP [†]	AM [‡]	AF [§]	DFF [‡]	IP [¶]	DM ^{††}	LM ^{‡‡}
Ambientes (Amb)	1	207523.7**	128725.3**	48.3*	56396**	0.18NS	97.6NS	34.6NS
Blo/Amb	4	1545.6**	1111.1**	2.2NS	57.6**	0.04**	15.1**	11.9**
Genotipos (Gen)	70	3305.4**	3479.8**	3.8**	324.3**	0.09**	25.6**	3.5**
Gen × Amb	70	505.4**	359.5**	3.2**	34.5**	0.03**	7.5**	1.4*
Error	280	222.1	176.1	1.1	8.5	0.01	3.6	1.1
CV (%)		6.4	11.1	60.4	3.0	10.28	4.2	6.8

Factor de variación	NH ^{§§}	PGM ^{‡‡}	P100G ^{‡‡‡}	EG ^{†††}	LG ^{‡‡‡}	AG ^{§§§}	CD ^{‡‡‡}	REN ^{‡‡‡}
Ambiente (Amb)	51.1 **	33989.5*	170.6NS	0.00095*	0.092**	0.0001NS	0.0388*	82.2**
Blo/Amb	0.2 NS	3426.1**	30.6*	0.00006NS	0.004NS	0.0008NS	0.0043**	2.1*
Genotipos (Gen)	8.1 **	2280.6**	116.6**	0.00393**	0.088**	0.0103**	0.0062**	6.1**
Gen × Amb	1.1 **	898.7**	27.6**	0.00045NS	0.009**	0.0023**	0.0005NS	3.7**
Error	0.6	367.0	9.9	0.00042	0.003	0.0012	0.0006	0.6
CV (%)	5.5	14.3	10.3	5.00485	4.824	4.0501	2.9812	14.9

GL: grados libertad, [†]AP: altura de planta, [‡]AM: altura de mazorca, [§]AF: asincronía floral, [‡]DFF: días a floración femenina, [¶]IP: índice de prolificidad, ^{††}DM: diámetro de mazorca, ^{‡‡}LM: longitud de mazorca, ^{§§}NH: número de hileras, ^{‡‡}PGM: peso total de granos de la mazorca, ^{‡‡‡}P100G: peso de 100 granos, ^{†††}EG: espesor del grano, ^{‡‡‡}LG: largo del grano, ^{§§§}AG: ancho del grano, ^{‡‡‡}CD: coeficiente de desgrane, ^{‡‡‡}REN: rendimiento, Blo/Amb: bloques anidados en ambientes, Gen × Amb: interacción genotipo × ambiente, CV: coeficiente de variación. NS: no significativo, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$.

nómicas, por efecto del ambiente, de los genotipos, de la interacción y por el uso de variedades divergentes como progenitores de las cruzas intervarietales. El uso de la diversidad genética permite identificar alelos favorables para el mejoramiento genético (Barrera-Guzmán *et al.*, 2020; González-Martínez *et al.*, 2020), conocer patrones heteróticos alternativos (Carena, 2005), que pueden aprovecharse para el desarrollo de variedades con mayor potencial productivo y amplia adaptación (Eze *et al.*, 2020; Velasco-García *et al.*, 2019).

Rendimiento y componentes del rendimiento

El rendimiento del 73.2 % de las cruzas intervarietales evaluadas fue estadísticamente igual a los testigos y superior a los progenitores, pero sólo se muestran las cinco cruzas de mayor rendimiento (Cuadro 2). La cruz C-14 superó en rendimiento hasta en 187 % al Prog-5, 53 % al Tes-5 y 31 % a MG. Las cruzas intervarietales muestran potencial de rendimiento, por la similitud con los testigos y por las marcadas diferencias con los progenitores y con MG.

Los híbridos convencionales generalmente son superiores en rendimiento comparados con otro tipo de genotipos no mejorados (Pixley, 2006; Duvick, 2005; Carena, 2005); sin embargo, los resultados del presente estudio no coinciden con la teoría. El rendimiento de las cruzas intervarietales fue estadísticamente igual a los testigos,

Cuadro 2. Rendimiento y componentes del rendimiento de cruzas sobresalientes de maíz (*Zea mays* L.) amarillo evaluadas en dos ambientes comparados con sus progenitores y los testigos.

Genotipos	DM [†] (mm)	LM [‡] (cm)	NH [§]	PGM [¶] (g)	P100G [‡] (g)	EG ^{††} (mm)	LG ^{‡‡} (cm)	AG ^{§§} (mm)	CD ^{¶¶}	REN ^{***} (Mg ha ⁻¹)
C-14	46.9 a	16.0 a	13.1 c	157.5 a	37.4 a	0.40 b	1.41 a	0.91 a	0.85 a	7.09 a
C-51	46.8 b	15.3 a	13.4 c	151.3 a	35.8 a	0.39 b	1.40 a	0.90 a	0.88 a	7.07 a
C-28	45.7 b	15.8 a	13.9 b	149.5 a	34.3 b	0.41 b	1.32 b	0.89 a	0.86 a	7.06 a
C-35	47.2 a	15.5 a	16.3 a	157.8 a	32.9 b	0.41 b	1.33 b	0.83 b	0.87 a	7.05 a
C-8	46.8 a	15.9 a	14.0 b	144.2 a	30.1 b	0.4 b	1.25 b	0.89 a	0.83 b	6.88 a
Prog-1	44.4 b	15.5 a	14.8 b	121.9 b	28.6 b	0.42 b	1.15 c	0.83 b	0.80 b	4.75 b
Prog-2	43.9 b	13.8 b	13.1 c	78.4 c	22.8 c	0.40 b	1.13 c	0.87 b	0.79 b	2.92 c
Prog-3	38.4 c	13.9 b	12.4 c	97.5 b	26.3 c	0.36 c	1.30 b	0.76 c	0.89 a	3.72 b
Prog-4	41.3 c	14.1 b	13.4 c	84.2 b	22.6 c	0.41 b	1.03 d	0.85 b	0.77 c	3.00 c
Prog-5	43.3 b	12.1 b	16.7 a	70.4 c	18.9 d	0.42 b	0.95 d	0.76 c	0.77 c	2.47 c
Prog-6	42.6 b	15.3 a	14.8 b	108.0 b	27.8 b	0.45 a	1.10 c	0.83 b	0.82 b	3.69 b
Prog-7	46.1 b	15.6 a	13.8 b	130.1 a	32.8 b	0.42 b	1.24 b	0.91 a	0.83 b	4.89 b
Prog-8	45.4 b	13.8 b	13.9 b	130.2 a	34.2 b	0.40 b	1.45 a	0.83 b	0.88 a	4.19 b
Tes-1	46.0 b	14.6 a	16.3 a	148.1 a	31.3 b	0.41 b	1.37 a	0.80 b	0.87 a	6.04 a
Tes-2	46.1 b	14.6 a	16.4 a	124.1 b	24.4 c	0.38 b	1.21 b	0.82 b	0.84 a	6.74 a
Tes-3	45.9 b	15.6 a	14.8 b	144.2 a	34.5 b	0.45 a	1.31 b	0.86 b	0.83 b	6.13 a
Tes-4	46.9 a	15.0 a	16.2 a	157.5 a	33.0 b	0.41 b	1.40 a	0.82 b	0.88 a	7.01 a
Tes-5	48.4 a	15.3 a	14.2 b	156.9 a	41.1 a	0.45 a	1.47 a	0.90 a	0.85 a	4.62 b
Tes-6	51.3 a	16.4 a	16.6 a	174.6 a	36.6 a	0.43 a	1.43 a	0.87 b	0.83 b	5.75 a
Tes-7	48.7 a	15.3 a	13.9 b	148.3 a	42.4 a	0.47 a	1.48 a	0.91 a	0.85 a	4.75 b
MG	45.3	15.5	14.4	133.3	30.5	0.41	1.30	0.86	0.84	5.40

[†]DM: diámetro de mazorca, [‡]LM: longitud de mazorca, [§]NH: número de hileras, [¶]PGM: peso total de granos de la mazorca, [‡]P100G: peso de 100 granos, ^{††}EG: espesor del grano, ^{‡‡}LG: longitud del grano, ^{§§}AG: ancho del grano, ^{¶¶}CD: coeficiente de desgrane, ^{***}REN: rendimiento, C: cruzas, Prog: progenitores, Tes: testigos, MG: media general. Medias con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

que varió de 5.15 a 7.09 Mg ha⁻¹ y que fue igual al de los híbridos convencionales, una VPL y superior a todos los progenitores. Se han encontrado diferentes genotipos que igualan o superan en rendimiento a los híbridos, tales como híbridos de poblaciones divergentes (Carena, 2005); VPL mejoradas (Espinosa-Calderón *et al.*, 2013); híbridos no convencionales y VPL (Martínez-Yañez *et al.*, 2017); cruzas entre razas de maíz (Velasco-García *et al.*, 2019); híbridos de poblaciones (Eze *et al.*, 2020); híbridos simples experimentales (Cieza *et al.*, 2020). Además, el uso de progenitores divergentes tiende a aumentar el rendimiento (Moll *et al.*, 1965).

El rendimiento de las cruzas intervarietales indicaron que tiene potencial comparado con híbridos convencionales, debido al uso de progenitores divergentes, que favorecen la expresión de caracteres que influyen en un mayor rendimiento, como las características agronómicas y los componentes del rendimiento.

El rendimiento es un carácter cuantitativo y está influenciado por la expresión conjunta de diferentes componentes del rendimiento, aunque la expresión de los componen-

tes varía según la constitución del genotipo. En la cruz C-14 hubo expresión del 77.77 % de los componentes, 88.89 % en los testigos y 33.33 % en los progenitores. Los componentes de rendimiento de mayor expresión en los genotipos evaluados fueron LM, PGM y CD, los cuales influyeron de manera positiva y diferenciada en el rendimiento (Cuadro 2). Son diferentes los componentes que se expresan, los más importantes son LM, DM, peso de 200 granos, NH y el número de granos por hilera (Velasco-García *et al.*, 2019); el número de granos, velocidad y duración del periodo de llenado de granos (Zhang *et al.*, 2019); DM, LM, NH (López-Morales *et al.*, 2020); LM, DM, NH y número de granos por hilera (Santiago-López *et al.*, 2020). En maíz amarillo son LM, NH, granos por hilera y granos por mazorca (Espinosa-Calderón *et al.*, 2013); el CD, NH, el peso de la mazorca, PGM, LG, AG y número de granos por hilera (Chura y Tejeda, 2014). Los resultados en este estudio indicaron que todos los componentes del rendimiento evaluados influyeron en el rendimiento y coincide con lo reportado por los diferentes autores, pero en las cruzas las de mayor importancia fueron DM, LM, PGM, P100G, LG, AG y CD lo cual se traduce en mazorcas y granos grandes, mayor proporción de granos por mazorca y, por lo tanto, mayor rendimiento.

Comportamiento agronómico

Los caracteres agronómicos, al igual que los componentes del rendimiento, influyeron de manera positiva y diferenciada en una mayor expresión del rendimiento, aunque la expresión de los caracteres varía en cada genotipo. En las cruzas C-14 y C-51 hubo expresión del 80 % de las características agronómicas y 60 % en los testigos y progenitores. Las características agronómicas de mayor expresión en los genotipos fueron AP, AF e IP (Cuadro 3). Las características que se expresan varían, tales como la reducción de la espiga, hojas más erguidas, menos macollos y menor porcentaje de proteína (Duvick, 2005); el tamaño y número de ramificaciones de la espiga (Nardino *et al.*, 2016); los días a floración masculina y DFF (López-Morales *et al.*, 2020). En maíz amarillo los días a floración masculina, DFF, el ángulo de inserción de la hoja e IP (Chura y Tejeda, 2014); los días a floración masculina, DFF, AP y AM (Espinosa-Calderón *et al.*, 2013). Los resultados en este estudio indicaron que todas las características agronómicas evaluadas influyeron en una mayor expresión del rendimiento y concuerdan con lo reportado por esos autores, aunque en las cruzas evaluadas las características más importantes fueron AP, AM, AF e IP, lo cual se traduce en plantas más grandes y productivas. Además, tienen valores bajos de DFF, indicando que son precoces; esto representa una ventaja en la disminución del ciclo biológico por la presencia de heladas tempranas, heladas tardías y temperatura baja en la zona de estudio.

Interacción Genotipo × Ambiente en el rendimiento

El rendimiento de 23 cruzas fue estadísticamente igual en ambas localidades, en cinco progenitores y 2 testigos; es decir no hubo interacción genotipo × ambiente. El rendimiento de las cinco mejores cruzas fue consistente porque no cambió al pasar de un ambiente a otro (Cuadro 4). En general, las cruzas y los progenitores rindieron más en

Cuadro 3. Comportamiento agronómico de cruzas sobresalientes de maíz (*Zea mays* L.) amarillo evaluadas en dos ambientes comparado con sus progenitores y los testigos.

Genotipos	AP [†] (cm)	AM [‡] (cm)	DFF [§]	AF [¶]	IP ^{‡‡}	REN ^{††} (Mg ha ⁻¹)
C-14	253.2 a	150.6 a	93.8 d	3.3 a	1.22 a	7.09 a
C-51	258.1 a	148.7 a	93.3 d	1.8 a	1.16 a	7.07 a
C-28	246.3 a	140.8 b	97.8 c	1.1 b	1.30 a	7.06 a
C-35	230.4 b	126.9 b	93.3 d	1.0 b	1.06 b	7.05 a
C-8	243.9 b	137.0 b	99.6 c	2.0 a	1.25 a	6.88 a
Prog-1	219.0 b	99.8 c	90.6 d	1.5 a	1.10 b	4.75 b
Prog-2	230.1 b	136.9 b	110.0 b	1.8 a	0.99 b	2.92 c
Prog-3	267.2 a	158.4 a	99.3 c	3.0 a	0.90 b	3.72 b
Prog-4	188.4 c	95.9 c	114.0 a	1.6 a	1.14 b	3.00 c
Prog-5	180.3 c	91.0 c	118.0 a	2.1 a	0.94 b	2.47 c
Prog-6	186.3 c	74.1 d	88.8 e	1.5 a	0.97 b	3.69 b
Prog-7	215.3 b	100.5 c	91.5 d	2.5 a	1.04 b	4.89 b
Prog-8	239.8 b	135.7 b	90.6 d	3.6 a	0.81 c	4.19 b
Tes-1	240.5 b	125.7 b	93.1 d	2.0 a	1.20 a	6.04 a
Tes-2	221.7 b	120.1 b	107.0 b	0.1 b	1.42 a	6.74 a
Tes-3	206.7 c	90.7 c	87.0 e	0.0 b	1.19 a	6.13 a
Tes-4	254.9 a	134.1 b	96.0 d	1.6 a	1.36 a	7.01 a
Tes-5	282.2 a	178.5 a	100.0 c	3.8 a	0.77 c	4.62 b
Tes-6	266.1 a	141.8 b	103.0 c	3.3 a	0.88 c	5.75 a
Tes-7	279.5 a	173.2 a	98.1 c	4.0 a	0.75 c	4.75 b
MG	229.3	119.3	97.1	1.7	1.08	5.40

[†]AP: altura de planta, [‡]AM: altura de mazorca, [§]DFF: días a floración femenina, [¶]AF: asincronía floral, ^{‡‡}IP: índice de prolificidad, ^{††}REN: rendimiento, C: cruzas, Prog: progenitores, Tes: testigos, MG: media general. Medias con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Montecillo y los testigos de polinización libre y el híbrido Tes-1 y Tes-4 en Ayapango, mientras que los Tes-2 y Tes-3 disminuyeron su rendimiento. El comportamiento del rendimiento fue diferente en cada genotipo y ambiente por separado; no así en las cruzas, lo cual demuestra que tienen amplia adaptación y estabilidad en el rendimiento. El efecto de interacción genotipo \times ambiente en la estabilidad del rendimiento de los genotipos fue diferente, debido a la falta de adaptación a los ambientes evaluados. Varía por las diversas condiciones ambientales en que se desarrollan; no obstante, se han encontrado genotipos estables como las cruzas simples experimentales (Sánchez-Ramírez *et al.*, 216); híbridos (Alí *et al.*, 2017) e híbridos de poblaciones (Eze *et al.*, 2020). Los resultados en este estudio indicaron que 23 cruzas tuvieron rendimientos consistentes y pueden cultivarse en ambas localidades de evaluación, lo cual podría atribuirse a que tiene mayor variabilidad genética que les permitió aminorar los efectos del ambiente, sin provocar cambios drásticos en el rendimiento, ya que sus progenitores

Cuadro 4. Comportamiento del rendimiento de cruzas sobresalientes de maíz (*Zea mays* L.) amarillo evaluadas en dos ambientes comparado con sus progenitores y los testigos.

Genotipos	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	
	Montecillo	Ayapango
C-14	7.10 a	7.08 a
C-51	7.06 a	7.09 a
C-28	7.21 a	6.92 a
C-35	7.99 a	6.11 a
C-8	7.65 a	6.11 a
Prog-1	5.16 b	4.33 b
Prog-2	3.91 b	1.93 c
Prog-3	3.07 b	4.38 b
Prog-4	3.61 b	2.39 c
Prog-5	3.69 b	1.25 c
Prog-6	4.25 b	3.14 b
Prog-7	5.28 b	4.50 b
Prog-8	3.40 b	4.98 b
Tes-1	6.57 a	5.51 a
Tes-2	8.52 a	4.97 b
Tes-3	7.15 a	5.11 b
Tes-4	7.59 a	6.44 a
Tes-5	3.09 b	6.14 a
Tes-6	4.52 b	6.98 a
Tes-7	2.30 c	7.20 a

C: cruzas, Prog: progenitores, Tes: testigos. Medias con letras diferentes en la misma hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

son divergentes. Por este motivo, podría suponerse que son de amplia adaptación y tiene estabilidad en el rendimiento, y pueden aprovecharse de manera inmediata como un primer acercamiento para la obtención de genotipos mejorados, mientras se procede a realizar la mejora genética para la obtención de híbridos con mayor nivel de endogamia que superen los potenciales de rendimiento aquí mostrados por las cruzas intervarietales.

Correlaciones

En la mayoría de las combinaciones entre variables se encontraron diferencias estadísticas. Se observó correlación positiva entre el REN y DM, LM, NH, PGM, P100G, LG, AG, CD y con todos los caracteres agronómicos (Cuadro 5). Las correlaciones positivas indican que tiene relación directa y mientras mayor sea, más fuerte será la asociación entre las variables. El caso contrario ocurrió con las correlaciones negativas, las cuales se asocian en sentido inverso. Las variables que se asocian de manera positiva con el rendimiento son el peso de grano y granos por mazorca (Milander *et al.*, 2016); el contenido de clorofila, mazorcas por planta, NH, materia seca total y DM (Ali

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre el rendimiento, los componentes del rendimiento y las características agronómicas en genotipos de maíz (*Zea mays* L.).

	AP [†]	AM [‡]	DFF [§]	AF [¶]	CD [•]	IP ^{††}	DM ^{¶¶}	LM ^{§§}	NH ^{pp}	PGM [≡]	P100G ⁺⁺⁺	EG ^{¶¶¶}	LG ^{§§§}	AG ^{ppp}
AM	0.94**													
DFF	-0.55**	-0.40**												
AF	0.03NS	0.09NS	0.25**											
CD	0.54**	0.51**	-0.40**	0.07NS										
IP	0.12NS	0.06NS	-0.10NS	-0.35**	0.07NS									
DM	0.15**	0.09NS	-0.23**	-0.10NS	-0.01NS	0.06NS								
LM	0.18**	0.08NS	-0.33**	-0.23**	0.11NS	0.15**	0.48**							
NH	-0.04NS	-0.12NS	-0.14**	-0.18**	-0.16**	0.10*	0.43**	0.12**						
PGM	0.42**	0.32**	-0.49**	-0.13**	0.46**	0.17**	0.74**	0.72**	0.25**					
P100G	0.36**	0.29**	-0.41**	0.07NS	0.42**	-0.06NS	0.61**	0.43**	-0.14**	0.76**				
EG	-0.26**	-0.31**	-0.07NS	-0.01NS	-0.34**	-0.19**	0.38**	0.22**	0.28**	0.15**	0.33**			
LG	0.56**	0.54**	-0.34**	0.14**	0.71**	-0.03NS	0.38**	0.22**	-0.14**	0.68**	0.75**	-0.17**		
AG	0.04NS	0.03NS	-0.07NS	-0.05NS	-0.07NS	0.03NS	0.46**	0.35**	-0.42**	0.32**	0.57**	0.24**	0.20**	
REN	0.44**	0.31**	-0.46**	-0.31**	0.39**	0.64**	0.43**	0.41**	0.16**	0.66**	0.47**	-0.05NS	0.43**	0.21**

[†]AP: altura de planta, [‡]AM: altura de mazorca, [§]DFF: días a floración femenina, [¶]AF: asincronía floral, [•]CD: coeficiente de desgrane, ^{††}IP: índice de prolificidad, ^{¶¶}DM: diámetro de mazorca, ^{§§}LM: longitud de mazorca, ^{pp}NH: número de hileras, [≡]PGM: peso total de granos de la mazorca, ⁺⁺⁺P100G: peso de 100 granos, ^{¶¶¶}EG: espesor del grano, ^{§§§}LG: largo del grano, ^{ppp}AG: ancho del grano, ^{≡≡≡}REN: rendimiento. NS: no significativo, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$.

et al., 2017); el índice de área foliar, el contenido de clorofila y fotosíntesis neta (Zhang *et al.*, 2018); IP, LM, DM y granos por hilera (Velasco-García *et al.*, 2019); número de granos (Ruiz *et al.*, 2019); el peso de la mazorca y el peso de grano (Cieza *et al.*, 2020). De manera similar se han encontrado asociaciones negativas como la concentración de proteína en el grano (Butts-Wilmsmeyer *et al.*, 2019). Todas las variables evaluadas se asociaron con el rendimiento y coinciden con lo reportado por esos otros autores. Las variables de mayor asociación con REN fueron PGM ($r = 0.66$), P100G ($r = 0.47$), LG ($r = 0.43$), IP ($r = 0.64$) y AP ($r = 0.44$), a mayores valores de estos en los genotipos, mayor rendimiento. Las variables con correlaciones negativas con REN fueron DFF ($r = -0.46$) y AF ($r = -0.31$), a mayores valores de estos, menor rendimiento, debido a que no habrá sincronización con la floración masculina. Por consiguiente, los caracteres se asocian de manera diferenciada con el rendimiento y entre los diferentes caracteres. Esta investigación destaca el potencial de rendimiento de las cruzas intervarietales, pues estadísticamente rindieron igual que los testigos y superaron a sus progenitores. El rendimiento se debió a la expresión conjunta y diferenciada de los componentes del rendimiento y características agronómicas, que se traduce en plantas grandes con buenas características de mazorcas y granos, y precoces. Además, en las cruzas que no hubo interacción Gen \times Amb, podrían suponerse que son de amplia adaptación y tienen estabilidad en el rendimiento. Por tal motivo, es promisorio el desarrollo y uso de las cruzas intervarietales como variedad mejorada para aumentar el rendimiento y la producción de maíz amarillo en ambientes variables.

Otra ventaja, es que la producción de semilla es fácil y barata. La principal limitante, es que no hay producción de semilla certificada de este tipo de material vegetal mejorado. Por lo tanto, se necesita unir esfuerzos multidisciplinarios entre instituciones y políticas públicas que apoyen el desarrollo y promoción de esta tecnología para condiciones poco favorables. Así mismo, es recomendable evaluar en otros ambientes diferentes a los estudiados, con el propósito de corroborar las características sobresalientes de las cruzas intervarietales y generar más conocimiento del potencial de rendimiento en ámbitos más amplios.

CONCLUSIONES

Las cruzas intervarietales tiene potencial de rendimiento comparado con híbridos convencionales (7.09 vs. 7.01 Mg ha⁻¹). Las características de la mazorca, del grano, la altura de planta y el índice de prolificidad fueron las que más influyeron en la expresión del rendimiento. Por esta razón, las cruzas intervarietales representan una alternativa viable para aumentar el rendimiento y la producción de maíz amarillo en ambientes variables.

REFERENCIAS

- Ali F, Ahsan M, Ali Q, Kanwal N. 2017. Phenotypic stability of *Zea mays* grain yield and its attributing traits under drought stress. *Frontiers in Plant Science* 8: 1397. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01397>
- Barrales DJS, Livera MM, González HVA, Peña VC, Kohashi-Shibata J, Castillo GF. 2002. Relaciones térmicas en el sistema suelo-planta-atmósfera durante la incidencia del fenómeno de enfriamiento o helada. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25 (3): 289–297.
- Barrera-Guzmán LA, Legaria-Solano JP, Ortega-Paczka R. 2020. Diversidad genética en poblaciones de razas mexicanas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (1): 121–125. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.121>
- Butts-Wilmsmeyer CJ, Seebauer JR, Singleton L, Below FE. 2019. Weather during key growth stages explains grain quality and yield of maize. *Agronomy* 9 (1): 16. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010016>
- Carena MJ. 2005. Maize commercial hybrids compared to improved population hybrids for grain yield and agronomic performance. *Euphytica* 141: 201–208. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-7072-0>
- Chura CJ, Tejeda SJ. 2014. Comportamiento de híbridos de maíz amarillo duro en la localidad de La Molina, Perú. *Idesia (Arica)* 32 (1): 113–118. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292014000100014>
- Cieza RI, Jara CTW, Terrones MR, Figueroa CYC, Valdera CA. 2020. Características agronómicas, componentes de producción y rendimiento de grano de híbridos de maíz (*Zea mays*). *Manglar* 17 (3): 261–267. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.038>
- Duvick DN. 2005. Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.). *Maydica* 50: 193–202.
- Espinosa-Calderón A, Tadeo-Robledo M, Turrent-Fernández A, Sierra-Macías M, Gómez-Montiel N, Zamudio-González B. 2013. Rendimiento de variedades precoces de maíz grano amarillo para Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 24 (1): 93–99.
- Eze CE, Akinwale RO, Michel S, Bürstmayr H. 2020. Grain yield and stability of tropical maize hybrids developed from elite cultivars in contrasting environments under a rainforest agroecology. *Euphytica* 216: 89. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02620-y>
- Freshley D, Delgado-Serrano MM. 2020. Learning from the past in the transition to open-pollinated varieties. *Sustainability* 12 (11): 4716. <https://doi.org/10.3390/su12114716>

- García-Salazar JA, Guzmán-Soria E. 2015. Factores que afectan la demanda de semilla mejorada de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38 (3): 319–327.
- González-Martínez J, Rocandio-Rodríguez M, Contreras-Toledo AR, Joaquín-Cancino S, Vano-ye-Eligio V, Chacón-Hernández JC, Hernández-Bautista A. 2020. Diversidad morfológica y agronómica de maíces nativos del Altiplano de Tamaulipas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (4): 361–370. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4.361>
- Hernández-Vázquez B, Mendoza-Castillo MC, Castillo-González F, Pecina-Martínez JA, Delgado-Alvarado A, Lobato-Ortiz R, García-Zavala JJ. 2018. Valoración agromorfológica de germoplasma de maíz amarillo en Valles Altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41 (4): 393–402. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4.393-402>
- López-Morales F, García-Zavala JJ, Corona-Torres T, Cruz-Izquierdo S, López-Romero G, Reyes-López D, Vásquez-Carrillo MG, Molina-Galán JD. 2020. Comparación del rendimiento y cambios morfológicos en maíz Tuxpeño V-520C adaptado a Valles Altos en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (2): 133–141. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.133>
- Martínez-Yáñez B, Tadeo-Robledo M, Benítez-Riquelme I, Vázquez-Carrillo G, Espinosa-Calderón A, Mejía-Contreras JA, López-López C, Martínez-Díaz F. 2017. Productividad de híbridos no convencionales de maíz de endospermo amarillo para Valles Altos de México. *Agrociencia* 51 (6): 635–647.
- Milander JJ, Jukic Z, Mason SC, Glausha T, Kmail Z. 2016. Plant population influence on maize yield components in Croatia and Nebraska. *Crop Science* 56 (5): 2742–2750. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.09.0565>
- Moll RH, Lonquist JH, Vélez FJ, Johnson EC. 1965. The relationship of heterosis and genetic divergence in maize. *Genetics* 52 (1): 139–144. <https://doi.org/10.1093/genetics/52.1.139>
- Muñoz OA, Miranda CS, Cuevas SJA, Santacruz VA, Sánchez DS. 2009. Resistencias, Prehistoria, Historia y Diferencias de Teocintle a Maíz. *Impresos América, Texcoco, Estado de México*, México, pp: 7–32.
- Nardino M, de Souza VQ, Baretta D, Konflanz VA, Carvalho IR, Follmann DN, Caron BO. 2016. Association of secondary traits with yield in maize F₁'s. *Ciência Rural* 46 (5): 776–782. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20150253>
- Palemón AF, Gómez MNO, Castillo GF, Ramírez VP, Molina GJD, Miranda CS. 2011. Cruzas intervarietales de maíz para la región semicálida de Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2 (5): 745–757.
- Pixley KV. 2006. Hybrid and open-pollinated varieties in modern agriculture. *In: Plant Breeding: The Arnel R. Hallauer International Symposium*. Lamkey KR, Lee M (eds.); Blackwell Publishing: Ames, IA, USA, pp: 234–250. <https://doi.org/10.1002/9780470752708.ch17>
- Ruiz MB, D'Andrea KE, Otegui ME. 2019. Phenotypic plasticity of maize grain yield and related secondary traits: differences between inbreds and hybrids in response to contrasting water and nitrogen regimes. *Field Crops Research* 239: 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.004>
- Sánchez-Ramírez FJ, Mendoza-Castillo MC, Mendoza-Mendoza CG. 2016. Estabilidad fenotípica de cruza simples e híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 39 (3): 269–275. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.3.269-275>
- Santiago-López N, García-Zavala JJ, Espinoza-Banda A, Santiago-López U, Esquivel-Esquivel G, Molina-Galán JD. 2020. Adaptación de maíz Tuxpeño a Valles Altos de México mediante selección masal. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (3): 259–265. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.3.259>
- SAS (Statistical Analysis System) Institute Inc. 2013. Base SAS® 9.4 procedures guide. High-performance procedures. Second edition. SAS Institute Inc, Cary, NC, USA. 568 p.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2021. Expectativas agroalimentarias 2021. Abril 2021. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Agricultura-SIAP. Ciudad de México, México. 60 p. <https://www.gob.mx/siap/documentos/expectativas-de-produccion-agropecuaria-pesquera-2021> (Recuperado: julio 2021).

- Tadeo RM, Espinosa CA, Arteaga EI, Trejo PV, Sierra MM, Valdivia BR, Zamudio GB. 2012. Productividad de variedades precoces de maíz de grano amarillo para Valles Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3 (7): 1417–1423. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1347>
- Velasco-García AM, García-Zavala JJ, Sahagún-Castellanos J, Lobato-Ortiz R, Sánchez-Abarca C, Marín-Montes IM. 2019. Rendimiento, componentes de rendimiento y heterosis de germoplasma de maíz adaptado a Valles Altos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42 (4): 367–374. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.367>
- Zhang H, Han M, Comas LH, DeJonge KC, Gleason SM, Trout TJ, Ma L. 2019. Response of maize yield components to growth stage-based deficit irrigation. *Agronomy Journal* 111 (6): 3244–3252. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0214>
- Zhang L, Liu H, Sun J, Li J, Song Y. 2018. Seedling characteristics and grain yield of maize grown under straw retention affected by sowing irrigation and splitting nitrogen use. *Field Crops Research* 225: 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.016>

GENETIC PARAMETERS AND SELECTION CRITERIA IN QUINOA

Miriam Gabriela Valverde-Ramos¹, Ignacio Benítez-Riquelme¹,
Salvador Miranda-Colín¹, Eduardo Espitia-Rangel^{2*}

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

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Carretera Los Reyes- Texcoco km. 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250.

* Author for correspondence: espitia.eduardo@inifap.gob.mx

ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a crop with high nutritional and agronomic potential, adapted to environmental stress conditions. It is grown on a small scale in Mexico, and currently improved varieties are not available. In order to establish the basis to guide genetic improvement in Mexico, the objective was to determine the genetic variability, heritability and interrelationships of yield and its components in 16 quinoa genotypes, in a randomized complete block design, in six environments in the central high valleys of Mexico. The proportion of participation of the sources of variation genetic, environmental, and genotype × environment interaction was determined; as well as heritability, response to selection, and phenotypic correlations among morphological characters, yield and its components. Out of 15 variables evaluated, the genetic effects on thousand-grains weight and grain filling period were the most important; whereas for plant height at flowering, harvest index, and stem diameter, environmental effects were the most relevant. The genotype × environment interaction is not greater than 20 % for the 15 variables evaluated. The highest values for additive variance, heritability, and response to selection were for grains per square meter, yield, thousand-grains weight, grain filling period, and panicle emergence. The variables stem diameter, plant height at maturity, grains per square meter, yield per day, grain filling period, and panicle emergence were the most correlated with yield. Therefore, they can be used as indirect yield selection criteria in breeding programs to obtain materials with better agronomic characteristics. Based on the genetic parameters obtained and the association of the variables with yield, grains per square meter, yield per day and plant height at maturity are the most appropriate traits for indirect selection for yield.

Keywords: *Chenopodium quinoa*, phenotypic correlations, genotypes, heritability, response to selection.

INTRODUCTION

The increase in world population and climate change are factors influencing the search for new plant species or genotypes capable of producing under conditions of environmental stress (Howell, 2001). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is an annual, dicotyledonous species of the Amaranthaceae family, adapted to water-restricted environments (Garcia *et al.*, 2003; Bazile *et al.*, 2016).

Citation: Valverde-Ramos MG, Benítez-Riquelme I, Miranda-Colín S, Espitia-Rangel E. 2022. Genetic parameters and selection criteria in quinoa. *Agrociencia*. 56(7): 1303-1327. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2501>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: February 24, 2022.
Approved: August 23, 2022.
Published in Agrociencia:
November 16, 2022.

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



The greatest diversity of genotypes and wild progenitors is reported around lake Titicaca in Peru and Bolivia, where it is native (Apaza *et al.*, 2013; Manjarres *et al.*, 2021). In its center of origin, Quinoa develops in a wide range of environments, from desert areas to regions with high rainfall; its cycle to physiological maturity of the grain is four to six months (Mujica *et al.*, 2001; Rojas *et al.*, 2014; Curti *et al.*, 2016); the colour of plants, inflorescence and seeds, inflorescence type and protein and saponin content are variable (Zurita-Silva *et al.*, 2014). This variability reflects the adaptation of the species to different agroecological conditions of soil, precipitation, nutrients, temperature, altitude, drought, salinity and environments rich in ultraviolet radiation (González *et al.*, 2015); all of which implies a high genetic plasticity of the crop (Ayala *et al.*, 2004, Morillo *et al.*, 2022).

Quinoa grain provides humans with all essential aminoacids (FAO, 2011); it is high in protein, fat and dietary fibre (Nowak *et al.*, 2016), as well as a high content of unsaturated fats, isoflavones, vitamins and minerals (Jaikishun *et al.*, 2019; Sampaio *et al.*, 2020); medicinal properties are also attributed to it (Valenzuela *et al.*, 2015).

In crop genetic improvement, the estimation of genetic parameters associated with yield is required to define selection schemes (Fuentes *et al.*, 2009). Crop yield is often analysed in terms of its yield components, and a high association between these components is an advantage to increase selection gains (Ligarreto and Ospina, 2009; Slafer *et al.*, 2014).

In order to define the genetic response to selection, it is necessary to quantify the genetic variability and heritability of the characters of the genetic materials or population to be improved. This variability is recorded in values of dispersion, range, phenotypic and genotypic variances; however, the coefficient of genetic variation is the appropriate parameter for this purpose (Ehdaie and Waines, 1989).

In Mexico, quinoa is currently a small-scale crop for which no improved varieties are available (Espitia *et al.*, 2019); thus, a genetic improvement program was initiated through the characterization of 100 collections introduced through the Amaranth Network (SADER) from Ecuador, Peru, Japan and Bolivia. From these, 15 materials were selected which showed the best behaviour and adaptation to Mexican conditions, and one huauzontle (*Chenopodium berlandieri* ssp *nutalliae*), also known as Mexican quinoa. The hypothesis of the study is based on the fact that the cultivars of *Chenopodium quinoa* Willd. evaluated have a wide genetic variation under the conditions studied; likewise, plant characteristics are positively correlated with yield, which allows defining selection criteria. The objective of this study was to determine the genetic variability, heritability and interrelationships of yield and its components in 16 quinoa genotypes.

MATERIALS AND METHODS

Plant material: Sixteen quinoa genotypes from different origins with varying fruit and grain color characteristics were evaluated (Table 1).

Table 1. *Chenopodium quinoa* genotypes used to determine genetic variability in six environments in Mexico.

Num.	Name	Fruit color	Grain color	Origin
1	Huauzontle	Yellow	White	Mexico
2	Tunkahuan	White	White	Ecuador
3	Tokio rosa	White	White	Japan
4	Blanca Ayacucho	White	White	Peru
5	Choclo	White	White	Peru
6	CP-forraje	White	White	Mexico
7	Pata de venado	White	White	Ecuador
8	Amarilla	Yellow	White	Peru
9	Misa amarilla	Yellow	White	Peru
10	Marangani	Yellow	White	Peru
11	Roja ku	Red	White	Peru
12	Rojita	Red	White	Peru
13	Pasankalla lila	Gray	Brown	Peru
14	Negra	Green	Black	Peru
15	Pasankalla reventona	Gray	Brown	Peru
16	Pasankalla plomo	Gray	Brown	Peru

Location of the experimental sites

Genotypes were evaluated at two locations, Santa Lucía de Prías, Texcoco, State of Mexico, located at 19° 26' 42" N, 98° 53' 15" W, and at an altitude of 2272 m in 2019, and Nanacamilpa, Tlaxcala, in 2018 and 2019, located at 19° 29' 22" N, 98° 33' 46" W, and at an altitude of 2825 m. These locations are similar in altitude and climate to the inter-Andean valleys where most of the genotypes in the trial originate. Two experiments were established in each environment. One in which fungicide was applied to the seed and the plant, and another without fungicide which were used to simulate an environment with and without disease (for a total of six environments) because *Peronospora variabilis* is the cause of a disease present throughout the world where is grown and represents the major health problem of the crop. In all three environments the soil texture is sandy loam. Rainfall in the crop cycle was 264 mm in Sta. Lucia with a planting date on June 28, 300 mm in Nanacamilpa 2018 with a planting date on July 25, and 364 mm in Nanacamilpa 2019 with a planting date on June 18.

Experimental design and crop management

In each experiment, the genotypes were distributed in a randomized complete block design with three replicates; the experimental plot consisted of three furrows 5 m long and 0.8 m apart. The crop was grown under rainfed conditions, without chemical fertilization or pest control. In all experiments, two manual weeding were carried out at 25 and 45 days after sowing (dds). In the environments with fungicide, Carboxin® and Captan® were applied before sowing at a dose of 1 g kg⁻¹ of seed; in addition, Metalaxyl® was applied 30 d after plant emergence, and Mancozeb® was applied 20 d later at a dose of 1.1 kg ha⁻¹ and 1.5 kg ha⁻¹, respectively.

Evaluated variables

The variables days to panicle emergence (EPA), days to maturity (MAD) and grain filling period (PLLG = MAD-EPA, days) were recorded, the first two when 50 % of the plants in each plot presented the inflorescence primordium or physiological maturity of the grain, respectively. At flowering, stem diameter (DIT, cm) was measured with a digital vernier (Stainless Hardened) and plant height (APF, cm) with a 3 m ruler. At grain maturity, plant height at maturity (ALM, cm) and panicle length (LPA, cm) were recorded; all measurements were taken from panicle emergence on 10 representative plants per plot.

At harvest, the number of panicles per square meter (PMC) of the plot was counted, which corresponded to the primary panicles. Biological yield (RB) was obtained by multiplying the fresh weight of the plot \times dry weight, which was determined by drying a 500 g fresh weight sample in an oven at 60 °C until a constant weight was reached and extrapolated to one hectare (ha). Grain yield (economic yield, RE) (KGH, kg ha⁻¹) was determined in 3 m of the central furrow, and extrapolated to one ha. The harvest index (IC) was estimated by the ratio of economic yield to biological yield. The yield per day (RPD, g) was calculated by the ratio of grain yield to days to maturity. Seed diameter (DIS, mm) was obtained in 10 groups of 10 seeds from each plot, measured with a digital vernier (Stainless Hardened). The hectolitre weight (PEH, kg hL⁻¹) was determined by weighing a known volume of seed, which was extrapolated to 100 L weight. The thousand-grains weight (PMG, g) was based on the weight of five groups of 100 grains from each plot and extrapolated to one thousand. The number of grains per square meter (GMC) was estimated from the yield per plot divided by the thousand-grains weight.

Genetic parameter estimation and data analysis

The variances for the estimation of genetic parameters were obtained with the application of the VARCOM procedure of the SAS package, by the REML method (SAS 9.4, 2012). The simple correlation analysis of yield and its components was performed with the CORR procedure of SAS (SAS 9.4, 2012). The coefficient of genetic variation was calculated as the quotient of the genetic standard deviation by the mean. Villaseñor *et al.* (2017) classified coefficients greater than 20 % as high genetic variability, from 12 to 20, intermediate, and less than 10, low. Since quinoa is a self-pollinating plant, the genetic variance of the material evaluated corresponds to that present among homozygous genotypes; therefore, the one calculated is the narrow sense heritability. Which was obtained by dividing the additive genetic variance by the phenotypic variance, and the response to selection by multiplying the standardized selection differential (5 %) by the heritability, and this product by the phenotypic standard deviation.

RESULTS AND DISCUSSION

Origin of the variation

Variation due to environmental factors was the main factor in 10 of the 15 variables evaluated (Figure 1), of which plant height at flowering was the one with the highest percentage (84 %). With values between 51 and 60 % were stem diameter, days to maturity, plant height at maturity, harvest index, and panicle emergence; within the range of 30 and 50 % there were panicle length, yield per day, grains per square meter, and grain yield. It is worth mentioning that grain yield and its proximate components were least affected by the environment, because the evaluation of genotypes was very high in these traits, contrary to the findings by Garrido *et al.* (2013), who indicated that for the same traits the most relevant variation was caused by the environment, which may be due to the fact that the environments of this study were less contrasting than the levels of drought tested by those authors.

Variation due to genotypes was of greater relevance than that attributed to the environment in thousand-grains weight and grain filling period (53 and 50 %, respectively), while for seed diameter and hectolitre weight the genotypic variation

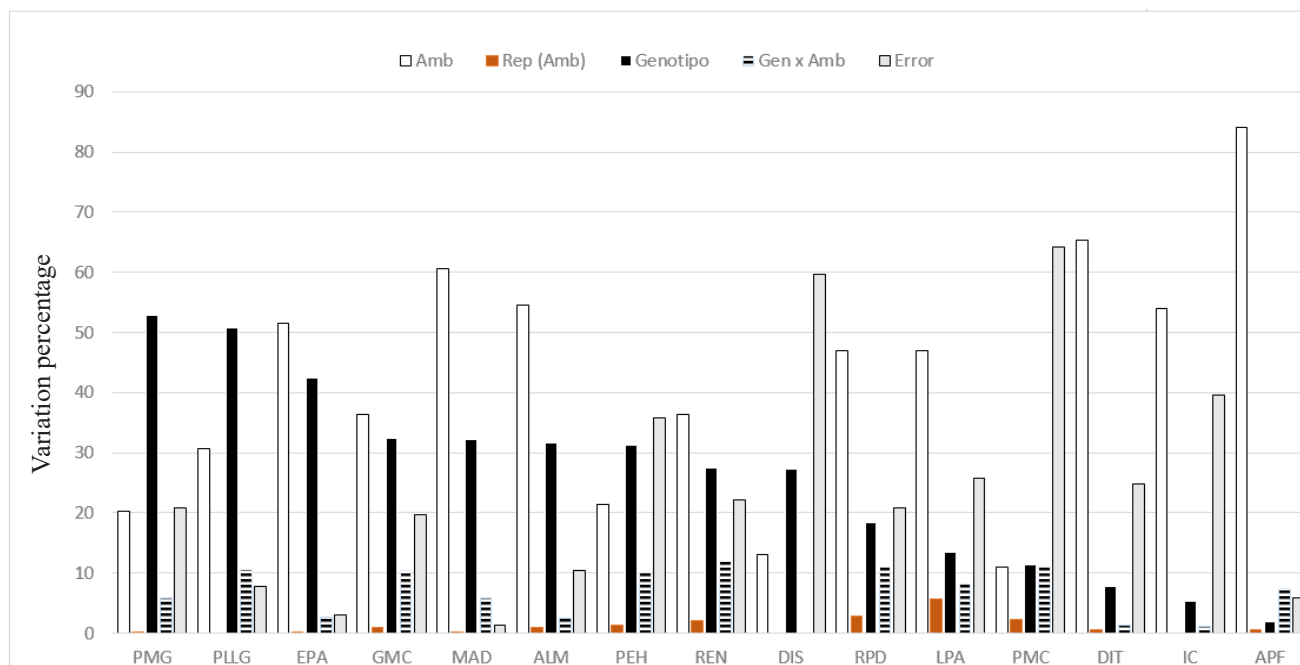


Figure 1. Proportion of variability due to sources of variation in 16 quinoa genotypes evaluated in six rainfed environments in the high valleys of central Mexico. EPA: panicle emergence, MAD: days to maturity, PLLG: grain filling period, LPA: panicle length, DIT: stem diameter, APF: plant height at flowering, ALM: plant height at maturity, DIS: seed diameter, RPD: yield per day, PHE: hectolitre weight, IC: harvest index, PMC: panicle per square meter, PMG: thousand-grains weight, GMC: grains per square meter and REN: grain yield.

was 42 and 32 % in regard to the total. The variation due to genotypes was greater in two of 15 variables in this study, contrary to what was reported by Espitia *et al.* (1992) that in 22 of 25 variables, variation attributed to genotypes was the most important, when evaluating 60 amaranth genotypes in two environments; this can be explained by the difference in the number of genotypes and environments studied in other researches.

The variation due to genotype × environment interaction was lower than that of the two main sources and less than 20 %. The literature, overall indicates the opposite, a greater variation due to genotype × environment interaction than that due to genotypes; especially for yield, harvest index, grains per square meter, and thousand-grains weight in quinoa (Garrido *et al.*, 2013). The similarity in the environments, characterized by almost the same precipitation and the inclusion of only two localities of high valleys of central Mexico with little longitude, altitude and latitude variation could be the cause to understand the low variation of the genotype × environment interaction.

The importance of identifying the origin of variability is that the plant breeder knows the proportion of variability that can be capitalized on in genetic improvement. For example, in this study grain yield showed 27.4 % variability due to genotype effect. In contrast, the harvest index showed 5.2 %, thus it will be easier for the breeder to increase the grain yield than the harvest index.

The coefficients of genetic variation (CVG) were high for GMC (31.18) and REN (24.51) (Table 2). In a second group were RPD, EPA, ALM, and PLLG with their respective

Table 2. Genetic parameters of 15 variables in 16 quinoa genotypes evaluated in six rainfed environments in high valleys of central Mexico, P-V 2018-2019.

Variables	σ^2_p	σ^2_G	CVG	h^2	R
Emergence of panicle (d)	126.41	53.7	14.219	0.425	9.852
Days to maturity (d)	258	83	6.718	0.322	10.656
Grain filling period (d)	126.6	64.27	10.994	0.508	11.784
Panicle length (cm)	61.51	8.26	6.945	0.134	2.173
Stem diameter (cm)	8.72	0.68	6.937	0.079	0.479
Plant height at flowering (cm)	1265.7	24.65	5.545	0.019	1.430
Plant height at maturity (cm)	1405	443.48	14.03	0.316	24.409
Seed diameter (mm)	0.058	0.016	6.122	0.273	0.135
Yield per day (kg)	80.24	14.77	19.629	0.184	3.401
Hectolitre weight (kg hL ⁻¹)	8.16	2.55	2.357	0.313	1.844
Harvest index	0.015	0.001	8.469	0.053	0.013
Panicles per square meter	12.53	1.42	7.63	0.113	0.825
One thousand-grains weight (g)	0.25	0.131	12.884	0.528	0.544
Grains per square meter	2.8E+09	908971332	31.186	0.325	35439.193
Grain yield (kg ha ⁻¹)	1493901.5	410372.1	24.516	0.275	692.654

σ^2_p : phenotypic variance, σ^2_G : genotypic variance, CVG: coefficient of genetic variation, h^2 : heritability in the strict sense, R: response to selection.

values from 10.99 to 19.62; that is, the genetic variability is medium. The other variables presented values lower than 10 %, which indicates that these are the variables with less genetic variability. In these latter variables with low variability and genetic gain, the breeding program should be focused on the introduction of new germplasm that contributes new allelic variants to favour the presence of individuals with desirable agronomic traits (Villaseñor *et al.*, 2017), or targeted crosses between germplasm with large genetic distances to generate new recombinants, and thus favor heterotic effects (Chura *et al.*, 2019).

The CVG are associated with a mean of the trait expression presented in Table 3. Within each CVG group there was variation in the means of the evaluated characters, which makes it possible to choose not only characters with high CVG, but also genotypes with better average for use as base germplasm, and to initiate with them a genetic improvement program. The averages are very similar to those of quinoa in its place of origin, since yields of 1500 to 3500 kg ha⁻¹ are reported in the Highland and Inter-Andean Valleys (Mujica *et al.*, 2022a). Therefore, it is feasible to initiate a breeding program with the genotypes evaluated in this study.

The highest heritabilities were found in PMG, PLLG and EPA (greater than 0.40) (Table 2), suggesting that these traits can be easily improved, since their variation is mainly due to genetic effects. In contrast, APF, IC, DIT, PMC, LPA, and RPD had low heritabilities (less than 0.25); these traits will be difficult to improve as they have considerable environmental influence. In an intermediate group are GMC, MAD, ALM, PHE, REN, and DIS, with heritability values from 0.27 to 0.32. Overall, the values found in this study differ to what was reported by Benlhabib *et al.* (2016), who estimated high heritability values for ALM, LPA, DIS, MAD, and REN, ranging from

Table 3. Means (M), standard deviation (DS), and maximum and minimum values of 15 variables in 16 quinoa genotypes evaluated in six rainfed environments of the high valleys of central Mexico, P-V 2018-2019.

Variables	Mean	DS	Minimum	Maximum
Emergence of panicle (d)	51	10.61	34	85
Days to maturity (d)	135	15.08	101	168
Grain filling period (d)	73	11	48	97
Panicle length (cm)	41.3	7.49	26.4	57.7
Stem diameter (cm)	11.9	2.78	6.3	19.6
Plant height at flowering (cm)	89.5	33	31	159
Plant height at maturity (cm)	150	35.39	78	240
Seed diameter (mm)	2	0.24	2	4
Yield per day (kg)	19.58	8.55	2.4	53.9
Hectolitre weight (kg hL ⁻¹)	67	2.78	59	75
Harvest index	0.33	0.12	0.05	0.77
Panicles per square meter	15.6	3.49	7.5	30
One thousand-grains weight (g)	2.81	0.48	1.59	4.38
Grains per square meter	96676	50749	8833	301877
Grain yield (kg ha ⁻¹)	2613	1174	325	7979

0.42 to 0.89, probably because these authors evaluated 72 recombinant lines in a single environment; therefore, their values over represented genetic effects in relation to environmental effects. This is an evident result of the differences due to the germplasm studied and, above all, to the evaluation environments.

In contrast, De Santis *et al.* (2016) found heritabilities for plant height at maturity, thousand-grains weight, harvest index, and grain yield ranging from 0.33 to 0.86 when studying 25 genotypes in two environments. This is an evident result of the differences due to the germplasm studied and, above all, to the evaluation environments. The germplasm response is differential in the particular environmental conditions in which it is evaluated. Results in this study agree with the heritability values for MAD, ALM, REN, and LPA reported by Mujica *et al.* (2022b), but differ for ALF, DIT, IC, and PMG. All of which indicates that the estimated values will largely depend on the genotypes or base populations used.

Regarding the response to selection, based on a selection pressure of 5 %, grains per square meter and grain yield, the gains would be greater than 25 % in regard to the average (Table 2). Within average values of response to selection there were yield per day, plant height at maturity, grain filling period, thousand-grains weight, and days to panicle emergence, since their response to selection corresponded to 15-20 % compared to the mean of each variable. The rest of the variables presented a low response to selection. The responses to selection found in this study are lower than those reported by De Santis *et al.* (2016). The greater the response to selection, the easier it is to improve that trait, while for low response it is necessary to introduce germplasm with greater variability for the trait of interest.

Correlations between variables

REN presented the highest correlations ($r = 0.65^{**}$ to 0.91^{**}) with DIT, ALM, GMC, and RPD, and medium correlations with ALF and LPA ($r = 0.44^{**}$ and 0.49^{**} , respectively) (Table 4), which is partly in agreement with those reported by Bhargava *et al.* (2006), who found correlations with yield of $r = 0.60^{**}$ for panicle length, $r = 0.50^{**}$ for plant height at maturity and $r = 0.49^{**}$ for thousand-grains weight. Significant, although low, correlations of REN with PLLG and IC were also found ($r = 0.12^{**}$ and 0.23^{**} respectively); some authors reported high correlations of harvest index with grain yield ($r = 0.78^{**}$) (De Santis *et al.*, 2016; Murphy *et al.*, 2019). In this study, no association of EPA, MAD, PMC, and PMC with REN was found, which is in agreement with the results by Madrid *et al.* (2018), who reported no association of grain yield with thousand-grains weight, and De Santis *et al.* (2016) and Benlhabib *et al.* (2016) for yield to days to maturity. As for GMC, it presented the highest correlations with REN ($r = 0.91^{**}$); in addition, it showed high association with RPD ($r = 0.82^{**}$), and ALM ($r = 0.70^{**}$).

Another important component of performance is PMG, which in this study presented no association with REN, showed a negative mean association with MAD, PHE, APF, EPA, and LPA with r values between -0.32^{**} and -0.44^{**} , and it also showed a positive

Table 4. Pearson's correlations of 15 variables in 16 quinoa genotypes evaluated in six rainfed environments in high valleys of central Mexico, P-V 2018-2019.

Variables	M1AD	PLLG	LPA	DIT	ALF	ALM	DIS	RPD	PEH	IC	PMC	PMG	GMC	REN
EPA	0.69	-0.07 ns	-0.37	-0.34	>0.00 ns	-0.07 ns	-0.21	-0.28	0.43	0.17	0.07	-0.37	0.056 ns	-0.11 ns
MAD		0.65	-0.063 ns	-0.17	0.31	0.13	-0.32	-0.24	0.44	-0.13	0.20	-0.44	0.17	0.03 ns
PLLG			0.29	0.10 ns	0.43	0.21	-0.26	-0.07 ns	0.22	-0.33	0.22	-0.24	0.15	0.12
LPA				0.57	0.47	0.62	-0.23	0.47	-0.06 ns	-0.38	-0.11 ns	-0.32	0.52	0.49
DIT					0.55	0.76	-0.021 ns	0.67	-0.11 ns	-0.56	-0.27	-0.04 ns	0.59	0.65
ALF						0.63	-0.28	0.32	0.24	-0.63	-0.07 ns	-0.38	0.53	0.44
ALM							-0.13	0.66	0.01 ns	-0.57	-0.18	-0.23	0.70	0.73
DIS								0.02 ns	-0.37	0.11 ns	-0.12	0.53	-0.28	-0.08 ns
RPD									-0.182	-0.19	-0.11 ns	0.05 ns	0.82	0.95
PEH										-0.04 ns	-0.10 ns	-0.44	0.09 ns	-0.08 ns
IC											0.14	0.23	-0.30	0.23
PMC												-0.02 ns	-0.03 ns	-0.06 ns
PMG													-0.45	-0.09 ns
GMC														0.91

EPA: panicle emergence, MAD: days to maturity, PLLG: grain filling period, LPA: panicle length, DIT: stem diameter, ALF: plant height at flowering, ALM: plant height at maturity, DIS: seed diameter, RPD: yield per day, PHE: hectolitre weight, IC: harvest index, PMC: panicle per square meter, PMG: thousand-grains weight, GMC: grains per square meter, and REN: grain yield; ns: non-significant values.

mean association with DIS ($r = 0.53^{**}$). This differs from the results reported by Madrid *et al.* (2018), who found no association of thousand-grains weight and seed diameter with none of the variables of Chilean quinoa. Upon this, it follows that higher values of GMC, RPD, ALM, LPA, and ALF would be expressed as higher yield in quinoa genotypes.

Selection criteria

Genetic gains and selection methods depend on genetic variability, heritability and the association of the trait of interest with other variables. In the genotypes of this study, in order to increase quinoa yield, it shall be necessary to select plants with greater panicle length, stem diameter, plant height at flowering, plant height at maturity, yield per day, and grains per square meter. However, the low coefficients of genetic variation for panicle length, stem diameter, and plant height at flowering suggest the need to introduce germplasm with these traits. Plant height at maturity and grains per square meter showed variability, heritability and correlation appropriate for the indirect selection of germplasm for yield. On the other hand, it is necessary to improve seed size, since it is fundamental in the commercialization and form of consumption of quinoa, since those that produce large grains are preferred for direct consumption and those with small grains for flour (Bonifacio *et al.*, 2015). If the objective is to increase seed size, it shall be necessary to select plants with higher thousand-grains weight, panicle weight per square meter, hectolitre weight, plant height at maturity, plant

height at flowering, panicle length, grain filling period, days to maturity and panicle emergence.

Grain yield showed high variability in the quinoa populations in this study, but had low heritability, thus a moderate response to selection would be expected. To improve the grain yield of these populations, it would be advisable to introduce more germplasm to improve not only yield but also other characteristics such as seed diameter, thousand-grains weight, maturity, and plant height.

CONCLUSIONS

It was found in this study that some quinoa variables are more affected by the environment, such as plant height at flowering and stem diameter, while other variables were more affected by the genotype, such as thousand-grains weight and grain filling period. Regarding the genetic parameters, it was found that grains per square meter, grain yield, and grain yield per day showed the greatest genetic variability.

The variables with the highest heritability were thousand-grains weight, grain filling period, and panicle emergence, while the best response to selection was for the variables grains per square meter, grain yield, thousand-grains weight, and panicle emergence. The greatest association of variables with grain yield was found with stem diameter, plant height at maturity, grains per square meter, yield per day, grain filling period, and panicle emergence.

Based on genetic parameters and association with yield, grains per square meter, yield per day, and plant height at maturity are the most appropriate traits for indirect selection for yield in *Chenopodium quinoa*.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for funding the master's degree on science studies for MG Valverde-Ramos. To the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) for its support to implement this research.

REFERENCES

- Apaza V, Cáceres G, Estrada R, Pinedo R. 2013. Catálogo de variedades comerciales de quinoa en el Perú. INIA. FAO Perú. Lima, Perú. <https://www.fao.org/3/as890s/as890s.pdf> (Retrieved: August 2021).
- Ayala G, Ortega L, Morón C. 2004. Valor nutritivo y usos de la quinoa. In: Quinoa: Ancestral Cultivo Andino, Alimento del Presente y Futuro. Mujica A, Jacobsen S, Izquierdo J, Marathe, JP (eds.); FAO. UNA. CIP. Santiago, Chile. pp: 215–253.
- Bazile D, Jacobsen S, Verniau A. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. *Frontiers in Plant Science* 7: 622. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
- Benlhabib O, Boujartani N, Maughan PJ, Jacobsen SE, Jellen EN. 2016. Elevated genetic diversity in an $F_{2,6}$ population of quinoa (*Chenopodium quinoa*) developed through an inter-ecotype cross. *Frontiers in Plant Science* 7: 1222. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01222>
- Bhargava A, Shukla S, Ohri D. 2006. Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in (*Chenopodium quinoa* Willd.); *Field Crops Research* 101 (1): 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.10.001>
- Bonifacio A, Gomez-Pando L, Rojas W. 2013. breeding and modern variety development. In: State of the Art Report on Quinoa Around the World in 2013, Bazile D, Bertero HD, Nieto

- C. (eds.); FAO/CIRAD. Rome, Italy pp: 172–191. https://www.academia.edu/21134586/Bazile_D_ed_Bertero_H_D_ed_Nieto_C_ed_2015_State_of_the_art_report_on_quinoa_around_the_world_in_2013_Roma_Italy_FAO_589_p (Retrieved: August 2021).
- Chura E, Mujica A, Haussmann B, Smith K, Flores S, Flores AL. 2019. Agronomic characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) progeny from close and distant self-fertilized s5 simple crosses. *International Journal of Agriculture and Natural Resources* 46 (2): 154–165. <https://dx.doi.org/10.7764/rcia.v46i2.2142>
- Curti RN, De la Vega AJ, Andrade AJ, Bramardi SJ, Bertero HD. 2016. Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in north west Argentina. *Field Crops Research*. 189: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.014>
- De Santis G, D'Ambrosio T, Rinaldi M, Rascio A. 2016. Heritabilities of morphological and quality traits and interrelationships with yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes in the Mediterranean environment. *Journal of Cereal Science* 70: 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.003>
- Ehdaie B, Waines JG. 1989. Genetic variation, heritability and path-analysis in landraces of bread wheat from southwestern Iran. *Euphytica* 41: 183–190. <https://doi.org/10.1007/BF00021584>
- Espitia RE, Valverde RMG, Sesma HLF, Rivas VP, y Ayala GAV. 2019. Caracterización de germoplasma de *Chenopodium* spp. en México. *In: Libro de Resúmenes VII Congreso Mundial de la Quinoa y otros granos Andinos*. Ministerio de agricultura, INDAP, Pontificia Universidad Católica de Chile y ODEPA (eds.); Génesis impresiones. Santiago, Chile. p. 19. https://issuu.com/quinoalab/docs/libro_de_res_menes_cmq_chile_2019 (Recuperado: agosto 2021).
- Espitia RE, Miranda CS, Castillo GF. 1992. Variabilidad genética e interrelaciones del rendimiento y sus componentes en alegría (*Amaranthus* spp). *Agrociencia Serie Fitociencia* 3: 83–98.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2011. La Quinoa: Cultivo Milenario para Contribuir a la Seguridad Alimentaria Mundial. Rojas W (coord.); PROINPA-FAO, Oficina Regional para América Latina y el Caribe. La Paz, Bolivia. <https://www.bivica.org/files/quinoa-cultivo-milenario.pdf> (Recuperado: agosto 2021).
- Fuentes FF, Maughan PJ, Pellen ER. 2009. Diversidad genética y recursos genéticos para el mejoramiento a quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Revista Geográfica de Valparaíso* 42: 20–33. https://www.pucv.cl/uuaa/site/docs/20180316/20180316172222/42_3.pdf (Retrieved: August 2021).
- García M, Raes D, Jacobsen S-E. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agricultural Water Management* 60: 119–134. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00162-2)
- Garrido M, Silva P, Silva H, Muñoz R, Baginsky C, Acevedo E. 2013. Evaluación del rendimiento de nueve genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* willd.) bajo diferentes disponibilidades hídricas en ambiente mediterráneo. *Idesia (Arica)* 31 (2): 69–76. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200010>
- González JA, Eisa SSS, Hussin SAES, Prado FE. 2015. Quinoa: an Incan crop to face global changes in agriculture. *In: Quinoa: Improvement and Sustainable Production*. Kevin M, Matanguihan J. (eds); Wiley-Blackwell. Hoboken, NJ USA pp: 1–18. <https://doi.org/10.1002/9781118628041.ch1>
- Howell TA. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal* 93 (2): 281–289. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>
- Jaikishun S, Li W, Yang Z, Song S. 2019. Quinoa: in perspective of global challenges. *Agronomy* 9 (4): 176. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040176>
- Ligarreto M GA, Ospina H AR. 2009. Análisis de parámetros heredables asociados al rendimiento y precocidad en arveja voluble (*Pisum sativum* L.) tipo Santa Isabel. *Agronomía Colombiana* 27 (3): 333–339. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13276/14165> (Retrieved: agosto 2021).
- Madrid D, Salgado E, Verdugo G, Olguín P, Bilalis D, Fuentes F. 2018. Morphological traits defining breeding criteria for coastal quinoa in Chile. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 46 (1): 190–196. <https://doi.org/10.15835/nbha46110788>

- Manjarres-Hernández EH, Morillo-Coronado AC, Ojeda-Pérez ZZ, Cárdenas-Chaparro A, Arias-Moreno DM. 2021. Characterization of the yield components and selection of materials for breeding programs of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Euphytica* 217: 101. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02837-5>
- Morillo C AC, Manjarres H EH, Morillo C Y. 2022. Phenotypic diversity of agromorphological characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) germplasm in Colombia. *Scientia Agricola* 79 (4): e20210017. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0017>
- Mujica A, Rojas-Beltrán JA, Bonifacio A, Fuentes F, De La Torre J, Álvarez A, Peiretti G, Barrientos, Peralta E, Caviedes M, Apaza J, Romero T. 2022a. Sistemas de producción de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Perú. In: La Quinoa el grano sagrado de los incas. Rojas-Beltrán J A, Ren G, Mujica, A (eds.); Cooperación Suiza en Bolivia- PIA-ACC. Cochabamba, Bolivia. pp: 123–151. http://web.dicyt.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2022/09/QUINUA-EL-GRANO-SAGRADO_compressed.pdf
- Mujica A, Moscoso G, Chuquimia D, Chura E, Poccoy M, Perales M. 2022b. Sistemas de producción de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Perú. In: La Quinoa el grano sagrado de los incas. Rojas-Beltrán J A, Ren G, Mujica, A (eds.); Cooperación Suiza en Bolivia- PIA-ACC. Cochabamba Bolivia. pp: 277–298. http://web.dicyt.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2022/09/QUINUA-EL-GRANO-SAGRADO_compressed.pdf
- Mujica A, Izquierdo J, Pierre JM. 2001. Origen y descripción de la quinua. In: Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. Mujica, A, Jacobsen, J, Izquierdo, S, Pierre, JM. (eds.); FAO. Santiago, Chile. pp: 1–8. <https://eds.p.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=2&sid=e1b25d7f-6091-433c-b655-e8b736fd2bbf%40redis&bdata=JnNpdGU9ZWZrLWxpdmU%3d#AN=fao.657319&db=cat02127a> (Retrieved: September 2022).
- Murphy KM, Matanguihan JB, Fuentes FF, Gómez-Pando LR, Jellen EN, Maughan PJ, Jarvis DE. 2019. Quinoa breeding and genomics. *Plant Breeding Reviews* 42: 257–320. <https://doi.org/10.1002/9781119521358.ch7>
- Nowak V, Du J, Charrondière UR. 2016. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry* 193: 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>
- Rojas W, Pinto M, Alanoca C, Gómez P L, León-Lobos P, Alercia A, Diulgheroff S, Padulosi S, Bazile D. 2014. Estado de la conservación *ex situ* de los recursos genéticos de quinua. In: Estado del Arte de la Quinoa en el Mundo en 2013. Bazile, D, Bertero HD, Nieto C (eds.); FAO (Santiago, Chile). CIRAD Trop Open reports. Montpellier, France. pp: 65–94. <https://agritrop.cirad.fr/574151/> (Recuperado: agosto 2021).
- Sampaio SL, Fernandes Â, Pereira C, Calhella RC, Sokovic M, Santos-Buelga C, Barros L, Ferreira ICFR. 2020. Nutritional value, physicochemical characterization and bioactive properties of the Brazilian quinoa BRS Piabiru. *Food & Function* 11 (4): 2969–2977. <https://doi.org/10.1039/D0FO00055H>
- Slafer GA, Savin R, Sandras VO. 2014. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research* 157: 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.004>
- Valenzuela A RN, Mita T G, Zapana Y FE, Quilla C D, Miranda A R, y Mita C UJ. 2015. Efecto de la germinación y cocción en las propiedades nutricionales de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). *Revista de Investigaciones Altoandinas* 17 (2): 169–172. <file:///C:/Users/ASPIRE/Downloads/Dialnet-EfectoDeLaGerminacionYCoccionEnLasPropiedadesNutri-5169791-1.pdf>
- Villaseñor M HE, Martínez C E, Hortelano SR R, González G M, Zamudio C A, Huerta E J, Espitia R E. 2017. Variabilidad genética y criterios de selección para calidad industrial de trigos introducidos en condiciones de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4: 661–672. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.39>
- Zurita-Silva A, Fuentes F, Zamora P, Jacobsen SE, Schwember AR. 2014. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. *Molecular Breeding* 34: 13–30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023-5>

PARÁMETROS GENÉTICOS Y CRITERIOS DE SELECCIÓN EN QUINUA

Miriam Gabriela Valverde-Ramos¹, Ignacio Benítez-Riquelme¹,
Salvador Miranda-Colín¹, Eduardo Espitia-Rangel^{2*}

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

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Carretera Los Reyes- Texcoco km. 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250.

* Autor para correspondencia: espitia.eduardo@inifap.gob.mx

RESUMEN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo con un alto potencial nutritivo y agronómico, adaptado a condiciones de estrés ambiental. En México se cultiva en pequeña escala y actualmente no se dispone de variedades mejoradas. Con el fin de establecer las bases para enfocar su mejoramiento genético en México, se planteó el objetivo de determinar la variabilidad genética, la heredabilidad y las interrelaciones del rendimiento y sus componentes en 16 genotipos de quinua, en un diseño de bloques completos al azar, en seis ambientes de los valles altos centrales de México. Se determinó la proporción de participación de las fuentes de variación genética, ambiental y la interacción genotipo × ambiente; también se determinó la heredabilidad, la respuesta a la selección y las correlaciones fenotípicas entre caracteres morfológicos, el rendimiento y sus componentes. De 15 variables evaluadas, los efectos genéticos en peso de mil granos y periodo de llenado de grano fueron los más importantes; mientras que, para altura de la planta a la floración, índice de cosecha y diámetro de tallo los efectos ambientales fueron los de mayor relevancia. La interacción genotipo × ambiente no es mayor al 20 % en las 15 variables evaluadas. Los mayores valores para la varianza aditiva, heredabilidad y la respuesta a la selección, fueron para granos por metro cuadrado, rendimiento, peso de mil granos, periodo de llenado de grano y emergencia de la panoja. La variables diámetro de tallo, altura de la planta a la madurez, granos por metro cuadrado y el rendimiento por día, periodo de llenado de grano y emergencia de panoja fueron las más correlacionadas con el rendimiento. Por lo tanto, pueden emplearse como criterios de selección indirecta del rendimiento en los programas de mejoramiento genético para la obtención de materiales con buenas características agronómicas. Con base en los parámetros genéticos obtenidos y en la asociación de las variables con el rendimiento, los granos por metro cuadrado, rendimiento por día y altura de planta a la madurez son los caracteres más apropiados para selección indirecta para el rendimiento.

Palabras clave: *Chenopodium quinoa*, correlaciones fenotípicas, genotipos, heredabilidad, respuesta a la selección.

INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial y el cambio climático son factores que influyen en la búsqueda de nuevas especies vegetales o de genotipos capaces de producir en

Citation: Valverde-Ramos MG, Benítez-Riquelme I, Miranda-Colín S, Espitia-Rangel E. 2022. Parámetros genéticos y criterios de selección en quinua.

Agrociencia. 56(7): 1303-1327. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2501>

Editor in Chief:

Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: February 24, 2022.

Approved: August 23, 2022.

Published in Agrociencia:

November 16, 2022.

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



condiciones de estrés ambiental (Howell, 2001). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es una especie anual, dicotiledónea, de la familia Amaranthaceae, adaptada a ambientes con restricciones hídricas (García *et al.*, 2003; Bazile *et al.*, 2016).

La mayor diversidad de genotipos y progenitores silvestres se reporta en los alrededores del lago Titicaca, en Perú y Bolivia, de donde es originaria (Apaza *et al.*, 2013; Manjarres *et al.*, 2021). En su centro de origen, la quinua se desarrolla en una gama amplia de ambientes, desde zonas desérticas hasta regiones con altas precipitaciones; su ciclo a madurez fisiológica del grano es de cuatro a seis meses (Mujica *et al.*, 2001; Rojas *et al.*, 2014; Curti *et al.*, 2016), el color de las plantas, inflorescencia y semillas, tipo de inflorescencia y contenido de proteínas y saponinas es variable (Zurita-Silva *et al.*, 2014). Esta variabilidad refleja la adaptación de la especie a diferentes condiciones agroecológicas de suelo, precipitación, nutrientes, temperatura, altitud, sequía, salinidad y ambientes ricos en radiación ultravioleta (González *et al.*, 2015); todo lo cual implica una alta plasticidad genética del cultivo (Ayala *et al.*, 2004, Morillo *et al.*, 2022). El grano de quinua provee al hombre de todos los aminoácidos esenciales (FAO, 2011); tiene un alto contenido de proteínas, grasa y fibra dietética (Nowak *et al.*, 2016), así como su alto contenido grasas insaturadas, isoflavonas, vitaminas y minerales (Jaikishun *et al.*, 2019; Sampaio *et al.*, 2020); también se le atribuyen propiedades medicinales (Valenzuela *et al.*, 2015).

En el mejoramiento genético de los cultivos, se requiere estimar los parámetros genéticos asociados con el rendimiento para definir los esquemas de selección (Fuentes *et al.*, 2009). El rendimiento de los cultivos se analiza a menudo en términos de sus componentes del rendimiento y una alta asociación entre estos componentes es una ventaja para incrementar las ganancias de la selección (Ligarreto y Ospina, 2009; Slafer *et al.*, 2014).

Para definir la respuesta genética a la selección, se requiere cuantificar la variabilidad genética y la heredabilidad de los caracteres de los materiales o población a mejorar. Esta variabilidad se registra en valores de dispersión, amplitud, varianzas fenotípica y genotípica; sin embargo, el coeficiente de variación genética es el parámetro apropiado para tal propósito (Ehdaie y Waines, 1989).

En México, actualmente la quinua es un cultivo de pequeña escala del que no se dispone de variedades mejoradas (Espitia *et al.*, 2019), por lo que se inició un programa de mejoramiento genético por medio de la caracterización de 100 colectas introducidas a través de la Red Amarantho (SADER) de Ecuador, Perú, Japón y Bolivia, de las cuales se seleccionaron 15 materiales de quinua los cuales presentaron mejor comportamiento y adaptación a las condiciones de México, y un huauzontle (*Chenopodium berlandieri* ssp *nutalliae*) también conocido como la quinua mexicana. La hipótesis del estudio se basa en que los cultivares de *Chenopodium quinoa* Willd. evaluados tienen una amplia variación genética bajo las condiciones estudiadas, así mismo las características de la planta están correlacionadas positivamente con el rendimiento, lo que permite definir criterios de selección. El objetivo de este estudio fue determinar la variabilidad genética, la heredabilidad y las interrelaciones del rendimiento y sus componentes en 16 genotipos de quinua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal: Se evaluaron 16 genotipos de quinua precedentes de diferentes orígenes con características de color de fruto y grano variable (Cuadro 1).

Localización del sitio experimental

Los genotipos se evaluaron en dos localidades, Santa Lucía de Prías, Texcoco, Estado de México, ubicada a 19° 26' 42'' N, 98° 53' 15'' O y a una altitud de 2272 m en 2019 y Nanacamilpa, Tlaxcala, en 2018 y 2019, ubicada a 19° 29' 22'' N, 98° 33' 46'' O y a una altitud de 2825 m. Estas localidades son parecidas en altitud y clima a los valles interandinos de donde son originarios la mayoría de los genotipos del ensayo. En cada ambiente se establecieron dos experimentos. Uno en el cual se aplicó fungicida a la semilla y a la planta; y otro sin fungicida que se utilizaron para simular un ambiente con enfermedad y sin enfermedad (para un total de seis ambientes) debido a que *Peronospora variabilis* es causante de una enfermedad presente en todo el mundo donde se cultiva la quinua y representa el mayor problema sanitario del cultivo. En los tres ambientes la textura del suelo es franco arenoso. La precipitación pluvial en el ciclo del cultivo fue de 264 mm en Sta. Lucía con fecha de siembra el 28 de junio, 300 mm en Nanacamilpa 2018 con fecha de siembra el 25 de julio y 364 mm en Nanacamilpa 2019 con fecha de siembra el 18 de junio.

Diseño experimental y manejo del cultivo

En cada experimento los genotipos se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones; la parcela experimental consistió en tres surcos de 5 m de largo con 0.8 m de separación. El cultivo se condujo en condiciones

Cuadro 1. Genotipos de *Chenopodium* quinoa utilizados para la determinación de la variabilidad genética en seis ambientes en México.

Núm.	Nombre	Color de fruto	Color de grano	Origen
1	Huauzontle	Amarillo	Blanco	México
2	Tunkahuan	Blanco	Blanco	Ecuador
3	Tokio rosa	Blanco	Blanco	Japón
4	Blanca Ayacucho	Blanco	Blanco	Perú
5	Choclo	Blanco	Blanco	Perú
6	CP-forraje	Blanco	Blanco	México
7	Pata de venado	Blanco	Blanco	Ecuador
8	Amarilla	Amarillo	Blanco	Perú
9	Misa amarilla	Amarillo	Blanco	Perú
10	Marangani	Amarillo	Blanco	Perú
11	Roja ku	Rojo	Blanco	Perú
12	Rojita	Rojo	Blanca	Perú
13	Pasankalla lila	Gris	Café	Perú
14	Negra	Verde	Negro	Perú
15	Pasankalla reventona	Gris	Café	Perú
16	Pasankalla plomo	Gris	Café	Perú

de secano (temporal), sin fertilización química, ni control de plagas. En todos los experimentos se realizaron dos deshierbes manuales, a los 25 y 45 días después de la siembra (dds). En los ambientes con fungicida, antes de la siembra se aplicó Carboxin® y Captan® en dosis de 1 g kg⁻¹ de semilla; además, a los 30 d de emergencia la planta se aplicó Metalaxil® y 20 d después de aplicó Mancozeb® en dosis de 1.1 kg ha⁻¹ y 1.5 kg ha⁻¹, respectivamente.

Variables evaluadas

Se registraron las variables días a emergencia de la panoja (EPA), días a madurez (MAD) y periodo del llenado de grano (PLLG = MAD-EPA, días), las dos primeras cuando el 50 % de las plantas de cada parcela presentaron el primordio de la inflorescencia o la madurez fisiológica del grano, respectivamente. En la floración se midió el diámetro de tallo (DIT, cm) con un vernier digital (Stainless Hardened) y la altura de la planta (APF, cm) con un regla de 3 m. A la madurez del grano se registró la altura de la planta a la madurez (ALM, cm) y la longitud de la panoja (LPA, cm), todas las mediciones se tomaron apartir de la emergencia de la panoja y se realizaron en 10 plantas representativas por parcela.

A la cosecha, se contabilizó el número de panojas por en 1 m² (PMC) de la parcela útil, el cual correspondió a las panojas primarias. El rendimiento biológico (RB) se obtuvo al multiplicar el peso fresco de la parcela útil × peso seco, el cual se determinó por secado en estufa de una muestra de 500 g peso fresco, a 60 °C hasta llegar a un peso constante y se extrapoló a una hectárea (ha). El rendimiento de grano (rendimiento económico, RE) (KGH, kg ha⁻¹) se determinó en 3 m del surco central, y se extrapoló a una ha. El índice de cosecha (IC) se estimó por medio de la relación del rendimiento económico y el rendimiento biológico. El rendimiento por día (RPD, g) se calculó con el cociente del rendimiento de grano entre días a madurez.

El diámetro de semilla (DIS, mm) se obtuvo en 10 grupos de 10 semillas de cada parcela, se midió con un vernier digital (Stainless Hardened). El peso hectolítrico (PEH, kg hL⁻¹) se determinó a través del peso de un volumen conocido de semilla y se extrapoló al peso de 100 L. El peso de mil granos (PMG, g) se basó en el peso de cinco grupos de 100 granos de cada parcela y extrapolados a mil. El número de granos por m² (GMC) se estimó a partir del rendimiento por parcela entre el peso de mil granos.

Estimación de parámetros genéticos y análisis de datos

Las varianzas para la estimación de los parámetros genéticos se obtuvieron con la aplicación del procedimiento VARCOM del paquete SAS, por el método REML (SAS 9.4 2012). El análisis simple de correlación del rendimiento y sus componentes se efectuó con el procedimiento CORR de SAS (SAS 9.4, 2012). El coeficiente de variación genética se calculó como el cociente de la desviación estándar genética entre la media. Villaseñor *et al.* (2017), clasificaron coeficientes mayores a 20 % como de variabilidad genética alta, de 12 a 20, intermedia y menores de 10, baja. Ya que la quinua es una planta autógama, la varianza genética del material evaluado corresponde con la

presente entre genotipos homogigóticos; por lo tanto, la heredabilidad calculada es en sentido estrecho. La cual se obtuvo al dividir la varianza genética aditiva entre la varianza fenotípica y la respuesta a la selección al multiplicar el diferencial de selección estandarizado (5 %) por la heredabilidad y este producto por la desviación estándar fenotípica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Origen de la variación

La variación debida a factores ambientales fue la principal en 10 de las 15 variables evaluadas (Figura 1), de las cuales la altura de planta a la floración fue la que presentó el porcentaje más alto (84 %). Con valores entre 51 y 60 % estuvieron el diámetro de tallo, días a madurez, altura de la planta a la madurez, índice de cosecha y emergencia de la panoja; en el intervalo de 30 y 50 %, se encontraron longitud de la panoja, rendimiento por día, granos por m² y rendimiento de grano. Es importante mencionar que el rendimiento de grano y sus componentes próximos, presentaron la menor afectación por el ambiente, debido a que la evaluación de genotipos fue muy alta en estos caracteres, contrario a lo encontrado por Garrido *et al.* (2013), quienes señalaron que para estos caracteres la variación más relevante fue provocada por el ambiente, lo cual

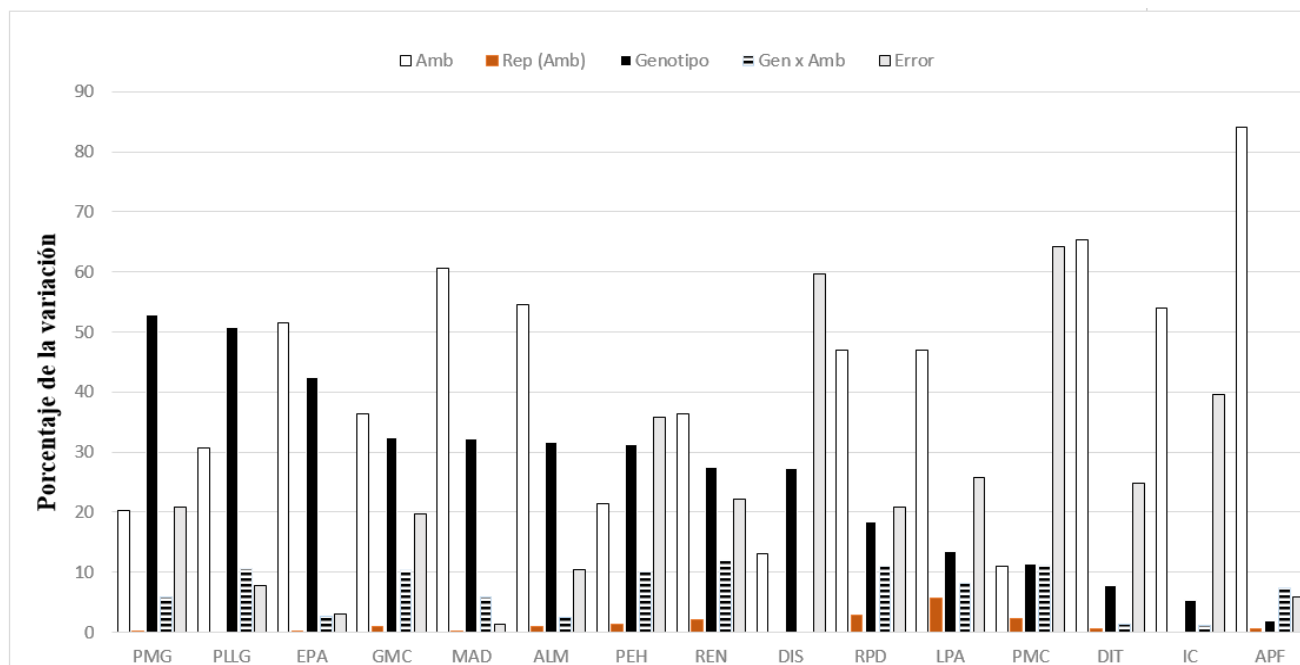


Figura 1. Proporción de la variabilidad debida a las fuentes de variación en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en los valles altos del centro de México. EPA: emergencia de la panoja, MAD: días a madurez, PLLG: periodo del llenado de grano, LPA: longitud de la panoja, DIT: diámetro del tallo, APF: altura de la planta a la floración, ALM: altura de la planta a la madurez, DIS: diámetro de semilla, RPD: rendimiento por día, PHE: peso hectolítrico, IC: índice de cosecha, PMC: panojas por m², PMG: peso de mil granos, GMC: granos por m² y REN: rendimiento de grano.

puede deberse a que los ambientes de este estudio fueron menos contrastantes que los niveles de sequía probados por esos autores.

La variación debida a genotipos fue de mayor relevancia que aquella atribuida al ambiente en el peso de mil granos y en el periodo de llenado de grano (53 y 50 %, respectivamente), mientras que para diámetro de semilla y peso hectolítrico la variación genotípica fue de 42 y 32 % respecto al total. La variación debida a genotipos fue mayor en dos de 15 variables en este estudio, contrario a lo reportado por Espitia *et al.* (1992) donde en 22 de 25 variables la variación atribuida a genotipos fue la más importante, al evaluar 60 genotipos de amaranto en dos ambientes, lo cual puede explicarse por la diferencia en el número de genotipos y ambientes estudiados en otras investigaciones. La variación debida a la interacción genotipo \times ambiente fue menor que la de las dos fuentes principales y menor al 20 %. La literatura, en general indica lo contrario, una mayor variación debida a la interacción genotipo \times ambiente que la debida a genotipos; en especial para rendimiento, índice de cosecha, granos por m² y peso de mil granos en quinua (Garrido *et al.*, 2013). La similitud en los ambientes, caracterizado casi por la misma precipitación y la inclusión de sólo dos localidades de Valles Altos de México con poca variación longitudinal, altitud y latitud podría ser la causa para entender la baja variación de la interacción genotipo \times ambiente.

La importancia de identificar el origen de la variabilidad radica en que el fitomejorador conozca la proporción de ella que podrá capitalizar en la mejora genética. Por ejemplo, en este estudio el rendimiento de grano presentó 27.4 % de variabilidad debida al efecto de genotipo. En contraste, el índice de cosecha presentó 5.2 %, por lo tanto será más fácil para el genetista incrementar el rendimiento de grano que el índice de cosecha.

Los coeficientes de variación genética (CVG) fueron altos para GMC (31.18) y REN (24.51) (Cuadro 2). En un segundo grupo estuvieron RPD, EPA, ALM y PLLG con valores respectivos de 10.99 a 19.62; es decir, la variabilidad genética es media. Las demás variables presentaron valores menores de 10 %, lo cual indica que son las variables con menor variabilidad genética. En estas últimas variables con poca variabilidad y ganancia genética el programa de mejoramiento debe estar enfocado hacia la introducción de germoplasma nuevo que aporte variantes alélicas nuevas para favorecer la presencia de individuos con características agronómicas deseables (Villaseñor *et al.*, 2017), o cruzamientos dirigidos entre germoplasma con grandes distancias genéticas para generar nuevos recombinantes y favorecer así los efectos heteróticos (Chura *et al.*, 2019).

Los CVG se asocian con una media de la expresión del carácter presentada en el Cuadro 3. Dentro de cada grupo de CVG hubo variación en las medias de los caracteres evaluados, lo cual posibilita elegir no sólo caracteres con CVG alto, sino también genotipos con mejor promedio para su uso como germoplasma base y con ellos iniciar un programa de mejora genética. Las medias son valores muy similares a los que presenta la quinua en su lugar de origen, ya que se reportan rendimientos de 1500 a 3500 kg ha⁻¹ en el Altiplano y Valles Interandinos (Mujica *et al.*, 2022a). Por lo tanto, es factible iniciar un programa de mejoramiento con los genotipos evaluados en este estudio.

Cuadro 2. Parámetros genéticos de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en valles altos del centro de México, P-V 2018-2019.

VARIABLES	σ^2_P	σ^2_G	CVG	h^2	R
Emergencia de panoja (d)	126.41	53.7	14.219	0.425	9.852
Días a madurez (d)	258	83	6.718	0.322	10.656
Periodo de llenado de grano (d)	126.6	64.27	10.994	0.508	11.784
Longitud de panoja (cm)	61.51	8.26	6.945	0.134	2.173
Diámetro de tallo (cm)	8.72	0.68	6.937	0.079	0.479
Altura de planta a la floración (cm)	1265.7	24.65	5.545	0.019	1.430
Altura de planta a la madurez (cm)	1405	443.48	14.03	0.316	24.409
Diámetro de semilla (mm)	0.058	0.016	6.122	0.273	0.135
Rendimiento por día (kg)	80.24	14.77	19.629	0.184	3.401
Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	8.16	2.55	2.357	0.313	1.844
Índice de cosecha	0.015	0.001	8.469	0.053	0.013
Panojas por metro cuadrado	12.53	1.42	7.63	0.113	0.825
Peso de mil granos (g)	0.25	0.131	12.884	0.528	0.544
Granos por metro cuadrado	2.8E+09	908971332	31.186	0.325	35439.193
Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	1493901.5	410372.1	24.516	0.275	692.654

σ^2_P : varianza fenotípica, σ^2_G : varianza genotípica, CVG: coeficiente de variación genética, h^2 : heredabilidad en sentido estricto, R: respuesta a la selección.

Cuadro 3. Medias (M), desviación estándar (DS) y valores máximos y mínimos de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano de los valles altos del centro de México, P-V 2018-2019.

VARIABLES	Media	DS	Mínimo	Máximo
Emergencia de panoja (d)	51	10.61	34	85
Días a madurez (d)	135	15.08	101	168
Periodo de llenado de grano (d)	73	11	48	97
Longitud de panoja (cm)	41.3	7.49	26.4	57.7
Diámetro de tallo (cm)	11.9	2.78	6.3	19.6
Altura de planta a la floración (cm)	89.5	33	31	159
Altura de planta a la madurez (cm)	150	35.39	78	240
Diámetro de semilla (mm)	2	0.24	2	4
Rendimiento por día (kg)	19.58	8.55	2.4	53.9
Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	67	2.78	59	75
Índice de cosecha	0.33	0.12	0.05	0.77
Panojas por metro cuadrado	15.6	3.49	7.5	30
Peso de mil granos (g)	2.81	0.48	1.59	4.38
Granos por metro cuadrado	96676	50749	8833	301877
Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	2613	1174	325	7979

Las heredabilidades más altas las presentaron PMG, PLLG y EPA (mayores que 0.40) (Cuadro 2), lo cual sugiere que estos caracteres pueden mejorarse fácilmente, ya que su variación se debe principalmente a efectos genéticos. En contraste, APF, IC, DIT,

PMC, LPA y RPD presentaron heredabilidades bajas (menores que 0.25); estas características serán difíciles de mejorar al tener una considerable influencia ambiental. En un grupo intermedio se encuentran GMC, MAD, ALM, PHE, REN y DIS, con valores de heredabilidad de 0.27 a 0.32. En general, los valores encontrados en este estudio difieren con lo reportado por Benlhabib *et al.* (2016), quienes estimaron valores altos de heredabilidad para ALM, LPA, DIS, MAD y REN, de entre 0.42 y 0.89, probablemente debido a que estos autores evaluaron 72 líneas recombinantes en un solo ambiente; por lo tanto, sus valores sobre representaron los efectos genéticos en relación con los efectos ambientales. Lo anterior es resultado evidente de las diferencias debidas al germoplasma estudiado y sobre todo de los ambientes de evaluación.

En contraste, De Santis *et al.* (2016) encontraron heredabilidades para altura de planta a la madurez, peso de mil granos, índice de cosecha y rendimiento de grano que van de 0.33 a 0.86 al estudiar 25 genotipos en dos ambientes. Lo anterior es resultado evidente de las diferencias debidas al germoplasma estudiado, y sobre todo, a los ambientes de evaluación. La respuesta del germoplasma es diferencial en las condiciones ambientales particulares en donde es evaluado. Los resultados de este estudio coinciden con los valores de heredabilidad para MAD, ALM, REN y LPA reportados por Mujica *et al.* (2022b), pero difieren en ALF, DIT, IC y PMG. Todo lo cual indica que los valores estimados dependerán en gran medida de los genotipos o poblaciones base utilizadas. En lo referente a la respuesta a la selección, con base en una presión de selección de 5 %, granos por metro cuadrado y rendimiento de grano, correspondería a ganancias mayores al 25 % respecto a la media (Cuadro 2). Con valores promedios de respuesta a la selección se ubicaron rendimiento por día, altura de planta a la madurez, periodo de llenado de grano, peso de mil granos y días a emergencia de la panoja, pues su respuesta a la selección correspondió a un 15-20 % respecto a la media de cada variable. El resto de las variables presentaron una respuesta a la selección baja. Las respuestas a la selección encontradas en este estudio son menores a las reportadas por De Santis *et al.* (2016). Entre mayor respuesta a la selección mayor facilidad de mejorar ese carácter, mientras que para la respuesta baja es necesario introducir germoplasma con mayor variabilidad para el carácter de interés.

Correlaciones entre variables

El REN presentó las correlaciones más altas ($r = 0.65^{**}$ a 0.91^{**}) con DIT, ALM, GMC y RPD, y correlaciones medias con ALF y LPA ($r = 0.44^{**}$ y 0.49^{**} , respectivamente) (Cuadro 4), lo cual concuerda en parte con lo reportado por Bhargava *et al.* (2006), quienes encontraron correlaciones con el rendimiento de $r = 0.60^{**}$ para longitud de panoja, $r = 0.50^{**}$ para altura de planta a la madurez y $r = 0.49^{**}$ para peso de mil granos. Se encontraron también correlaciones significativas, aunque bajas, del REN con PLLG e IC ($r = 0.12^{**}$ y 0.23^{**} respectivamente; algunos autores reportaron correlaciones altas de índice de cosecha con rendimiento de grano ($r = 0.78^{**}$) (De Santis *et al.*, 2016; Murphy *et al.*, 2019). En este estudio no se encontró asociación de EPA, MAD, PMC y PMC con el REN, lo que coincide con los resultados de Madrid *et al.* (2018), quienes

Cuadro 4. Correlaciones de Pearson de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en valles altos del centro de México, P-V 2018-2019.

Variables	M1AD	PLLG	LPA	DIT	ALF	ALM	DIS	RPD	PEH	IC	PMC	PMG	GMC	REN
EPA	0.69	-0.07 ns	-0.37	-0.34	>0.00 ns	-0.07 ns	-0.21	-0.28	0.43	0.17	0.07	-0.37	0.056 ns	-0.11 ns
MAD		0.65	-0.063 ns	-0.17	0.31	0.13	-0.32	-0.24	0.44	-0.13	0.20	-0.44	0.17	0.03 ns
PLLG			0.29	0.10 ns	0.43	0.21	-0.26	-0.07 ns	0.22	-0.33	0.22	-0.24	0.15	0.12
LPA				0.57	0.47	0.62	-0.23	0.47	-0.06 ns	-0.38	-0.11 ns	-0.32	0.52	0.49
DIT					0.55	0.76	-0.021 ns	0.67	-0.11 ns	-0.56	-0.27	-0.04 ns	0.59	0.65
ALF						0.63	-0.28	0.32	0.24	-0.63	-0.07 ns	-0.38	0.53	0.44
ALM							-0.13	0.66	0.01 ns	-0.57	-0.18	-0.23	0.70	0.73
DIS								0.02 ns	-0.37	0.11 ns	-0.12	0.53	-0.28	-0.08 ns
RPD									-0.182	-0.19	-0.11 ns	0.05 ns	0.82	0.95
PEH										-0.04 ns	-0.10 ns	-0.44	0.09 ns	-0.08 ns
IC											0.14	0.23	-0.30	0.23
PMC												-0.02 ns	-0.03 ns	-0.06 ns
PMG													-0.45	-0.09 ns
GMC														0.91

EPA: emergencia de panoja, MAD: días a madurez, PLLG: periodo de llenado de grano, LPA: longitud de la panoja, DIT: diámetro de tallo, ALF: altura de la planta a la floración, ALM: altura de planta a la madurez, DIS: diámetro de la semilla, RPD: rendimiento por día, PHE: peso hectolítrico, IC: índice de cosecha, PMC: panojas por m², PMG: peso de mil granos, GMC: granos por m² y REN: rendimiento de grano; ns: valores no significativos.

reportaron ausencia de asociación del rendimiento de grano con peso de mil granos y De Santis *et al.* (2016) y Benlhabib *et al.* (2016) para rendimiento con días a madurez. En cuanto a GMC, presentó las correlaciones más altas con REN ($r = 0.91^{**}$); además, mostró asociación alta con RPD ($r = 0.82^{**}$) y ALM ($r = 0.70^{**}$).

Otro componente importante del rendimiento es el PMG, la cual en este estudio no presentó asociación con el REN, mostró asociación media negativa con MAD, PHE, APF, EPA y LPA con valores de r entre -0.32^{**} y -0.44^{**} , presentó además asociación media y positiva con DIS ($r = 0.53^{**}$). Esto difiere de los resultados reportados por Madrid *et al.* (2018), quienes no encontraron asociación del peso de mil granos y diámetro de semilla con ninguna de las variables en quinuas chilenas. De esto se desprende que valores mayores de GMC, RPD, ALM, LPA y ALF se reflejarían en un mayor rendimiento en genotipos de quinua.

Crterios de seleccin

Las ganancias genéticas y los metodos de seleccin dependen de la variabilidad genética, la heredabilidad y la asociacin del carcter de interés con otras variables. En los genotipos de este estudio, para incrementar el rendimiento de quinua se tendrán que seleccionar plantas con mayor longitud de la panoja, diámetro del tallo, altura de la planta a la floración, altura de planta a la madurez, rendimiento por día y granos por metro cuadrado. Sin embargo, los bajos coeficientes de variación genética de longitud de panoja, diámetro de tallo, y altura de planta a la floración sugieren la necesidad de

introducir germoplasma con estas características. La altura de la planta a la madurez y granos por metro cuadrado presentaron variabilidad, heredabilidad y correlación apropiados para la selección indirecta del germoplasma para el rendimiento. Por otra parte, es necesario mejorar el tamaño de semilla, ya que es fundamental en la comercialización y forma de consumo de la quinua, pues las que producen grano grande se prefieren para consumo directo y las de grano pequeño para harinas (Bonifacio *et al.*, 2015). Si el objetivo es incrementar el tamaño de semilla se deberán seleccionar plantas con mayor peso de mil granos, panojas por metro cuadrado, peso hectolítrico, altura de la planta a la madurez, altura de la planta a la floración, longitud de panoja, periodo del llenado de grano, días a madurez y emergencia de panoja.

El rendimiento de grano presentó una variabilidad alta en las poblaciones de quinua de este estudio, pero tuvo una heredabilidad baja, por lo que se esperaría una respuesta moderada a la selección. Para mejorar el rendimiento de grano de estas poblaciones sería recomendable introducir más germoplasma a fin de mejorar no solo el rendimiento sino otras características como diámetro de semilla, peso de mil granos, madurez y altura de planta.

CONCLUSIONES

En este estudio se encontró que hay variables de la quinua que son más afectadas por el ambiente, tal es el caso de altura de la planta a la floración y diámetro del tallo, mientras que otras variables resultaron más afectadas por el genotipo como peso de mil granos y periodo de llenado de grano. En relación con los parámetros genéticos se encontró que granos por metro cuadrado, rendimiento de grano y rendimiento de grano por día fueron las que presentaron mayor variabilidad genética.

Las variables que presentaron mayor heredabilidad fueron peso de mil granos, periodo de llenado de grano y emergencia de panoja; mientras que la mejor respuesta a la selección la presentaron las variables granos por metro cuadrado, rendimiento de grano, peso de mil granos y emergencia de panoja. La mayor asociación de variables con el rendimiento de grano se tuvo con el diámetro de tallo, altura de planta a la madurez, granos por metro cuadrado, rendimiento por día, periodo de llenado de grano y emergencia de panoja.

Con base en los parámetros genéticos y en la asociación con el rendimiento, granos por metro cuadrado, rendimiento por día y altura de planta a la madurez son los caracteres más apropiados para selección indirecta para el rendimiento de *Chenopodium quinoa*.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para los estudios de maestría de MG Valverde-Ramos. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo otorgado en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Apaza V, Cáceres G, Estrada R, Pinedo R. 2013. Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú. INIA. FAO Perú. Lima, Perú. <https://www.fao.org/3/as890s/as890s.pdf> (Recuperado: agosto 2021).
- Ayala G, Ortega L, Morón C. 2004. Valor nutritivo y usos de la quinua. *In: Quinua: Ancestral Cultivo Andino, Alimento del Presente y Futuro*. Mujica A, Jacobsen S, Izquierdo J, Marathe, JP (eds.); FAO. UNA. CIP. Santiago, Chile. pp: 215–253.
- Bazile D, Jacobsen S, Verniau A. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. *Frontiers in Plant Science* 7: 622. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
- Benlhabib O, Boujartani N, Maughan PJ, Jacobsen SE, Jellen EN. 2016. Elevated genetic diversity in an F_{2,6} population of quinoa (*Chenopodium quinoa*) developed through an inter-ecotype cross. *Frontiers in Plant Science* 7: 1222. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01222>
- Bhargava A, Shukla S, Ohri D. 2006. Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.); *Field Crops Research* 101 (1): 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.10.001>
- Bonifacio A, Gomez-Pando L, Rojas W. 2013. Quinoa breeding and modern variety development. *In: State of the Art Report on Quinoa Around the World in 2013*, Bazile D, Bertero HD, Nieto C. (eds.); FAO/CIRAD. Rome, Italy pp: 172–191. https://www.academia.edu/21134586/Bazile_D_ed_Bertero_H_D_ed_Nieto_C_ed_2015_State_of_the_art_report_on_quinoa_around_the_world_in_2013_Roma_Italy_FAO_589_p (Recuperado: agosto 2021).
- Chura E, Mujica A, Haussmann B, Smith K, Flores S, Flores AL. 2019. Agronomic characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) progeny from close and distant self-fertilized s5 simple crosses. *International Journal of Agriculture and Natural Resources* 46 (2): 154–165. <https://dx.doi.org/10.7764/rcia.v46i2.2142>
- Curti RN, De la Vega AJ, Andrade AJ, Bramardi SJ, Bertero HD. 2016. Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in north west Argentina. *Field Crops Research*. 189: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.014>
- De Santis G, D'Ambrosio T, Rinaldi M, Rascio A. 2016. Heritabilities of morphological and quality traits and interrelationships with yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes in the Mediterranean environment. *Journal of Cereal Science* 70: 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.003>
- Ehdaie B, Waines JG. 1989. Genetic variation, heritability and path-analysis in landraces of bread wheat from southwestern Iran. *Euphytica* 41: 183–190. <https://doi.org/10.1007/BF00021584>
- Espitia RE, Valverde RMG, Sesma HLF, Rivas VP, y Ayala GAV. 2019. Caracterización de germoplasma de *Chenopodium* spp. en México. *In: Libro de Resúmenes VII Congreso Mundial de la Quinua y otros granos Andinos*. Ministerio de agricultura, INDAP, Pontificia Universidad Católica de Chile y ODEPA (eds.); Génesis impresiones. Santiago, Chile. p. 19. https://issuu.com/quinoalab/docs/libro_de_res_menes_cmq_chile_2019 (Recuperado: agosto 2021).
- Espitia RE, Miranda CS, Castillo GF. 1992. Variabilidad genética e interrelaciones del rendimiento y sus componentes en alegría (*Amaranthus* spp). *Agrociencia Serie Fitociencia* 3: 83–98.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2011. La Quinua: Cultivo Milenario para Contribuir a la Seguridad Alimentaria Mundial. Rojas W (coord.); PROINPA–FAO, Oficina Regional para América Latina y el Caribe. La Paz, Bolivia. <https://www.bivica.org/files/quinua-cultivo-milenario.pdf> (Recuperado: agosto 2021).
- Fuentes FF, Maughan PJ, Pellen ER. 2009. Diversidad genética y recursos genéticos para el mejoramiento a quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Revista Geográfica de Valparaíso* 42: 20–33. https://www.pucv.cl/uuaa/site/docs/20180316/20180316172222/42_3.pdf (Recuperado: agosto 2021).
- García M, Raes D, Jacobsen S-E. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agricultural Water Management* 60: 119–134. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00162-2)
- Garrido M, Silva P, Silva H, Muñoz R, Baginsky C, Acevedo E. 2013. Evaluación del rendimiento de nueve genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* willd.) bajo diferentes disponibilidades hídricas en ambiente mediterráneo. *Idesia (Arica)* 31 (2): 69–76. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200010>

- González JA, Eisa SSS, Hussin SAES, Prado FE. 2015. Quinoa: an Incan crop to face global changes in agriculture. *In: Quinoa: Improvement and Sustainable Production*. Kevin M, Matanguihan J. (eds); Wiley-Blackwell. Hoboken, NJ USA pp: 1–18. <https://doi.org/10.1002/9781118628041.ch1>
- Howell TA. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal* 93 (2): 281–289. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>
- Jaikishun S, Li W, Yang Z, Song S. 2019. Quinoa: in perspective of global challenges. *Agronomy* 9 (4): 176. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040176>
- Ligarreto M GA, Ospina H AR. 2009. Análisis de parámetros heredables asociados al rendimiento y precocidad en arveja voluble (*Pisum sativum* L.) tipo Santa Isabel. *Agronomía Colombiana* 27 (3): 333–339. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13276/14165> (Recuperado: agosto 2021).
- Madrid D, Salgado E, Verdugo G, Olgún P, Bilalis D, Fuentes F. 2018. Morphological traits defining breeding criteria for coastal quinoa in Chile. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 46 (1): 190–196. <https://doi.org/10.15835/nbha46110788>
- Manjarres-Hernández EH, Morillo-Coronado AC, Ojeda-Pérez ZZ, Cárdenas-Chaparro A, Arias-Moreno DM. 2021. Characterization of the yield components and selection of materials for breeding programs of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Euphytica* 217: 101. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02837-5>
- Morillo C AC, Manjarres H EH, Morillo C Y. 2022. Phenotypic diversity of agromorphological characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) germplasm in Colombia. *Scientia Agricola* 79 (4): e20210017. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0017>
- Mujica A, Rojas-Beltrán JA, Bonifacio A, Fuentes F, De La Torre J, Álvarez A, Peiretti G, Barrientos, Peralta E, Caviedes M, Apaza J, Romero T. 2022a. Sistemas de producción de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Perú. *In: La Quinoa el grano sagrado de los incas*. Rojas-Beltrán J A, Ren G, Mujica, A (eds.); Cooperación Suiza en Bolivia-PIA-ACC. Cochabamba, Bolivia. pp: 123–151. http://web.dicyt.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2022/09/QUINUA-EL-GRANO-SAGRADO_compressed.pdf
- Mujica A, Moscoso G, Chuquimia D, Chura E, Poccoy M, Perales M. 2022b. Sistemas de producción de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Perú. *In: La Quinoa el grano sagrado de los incas*. Rojas-Beltrán J A, Ren G, Mujica, A (eds.); Cooperación Suiza en Bolivia-PIA-ACC. Cochabamba Bolivia. pp: 277–298. http://web.dicyt.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2022/09/QUINUA-EL-GRANO-SAGRADO_compressed.pdf
- Mujica A, Izquierdo J, Pierre JM. 2001. Origen y descripción de la quinua. *In: Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. Mujica, A, Jacobsen, J, Izquierdo, S, Pierre, JM. (eds.); FAO. Santiago, Chile. pp: 1–8. <https://eds.p.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=2&sid=e1b25d7f-6091-433c-b655-e8b736fd2bbf%40redis&bdata=JnNpdGU9ZWZlWxpdmU%3d#AN=fao.657319&db=cat02127a> (Recuperado: septiembre 2022).
- Murphy KM, Matanguihan JB, Fuentes FF, Gómez-Pando LR, Jellen EN, Maughan PJ, Jarvis DE. 2019. Quinoa breeding and genomics. *Plant Breeding Reviews* 42: 257–320. <https://doi.org/10.1002/9781119521358.ch7>
- Nowak V, Du J, Charrondière UR. 2016. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry* 193: 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>
- Rojas W, Pinto M, Alanoca C, Gómez P L, León-Lobos P, Alercia A, Diulgheroff S, Padulosi S, Bazile D. 2014. Estado de la conservación *ex situ* de los recursos genéticos de quinua. *In: Estado del Arte de la Quinoa en el Mundo en 2013*. Bazile, D, Bertero HD, Nieto C (eds.); FAO (Santiago, Chile). CIRAD Trop Open reports. Montpellier, France. pp: 65–94. <https://agritrop.cirad.fr/574151/> (Recuperado: agosto 2021).
- Sampaio SL, Fernandes Â, Pereira C, Calhelha RC, Sokovic M, Santos-Buelga C, Barros L, Ferreira ICFR. 2020. Nutritional value, physicochemical characterization and bioactive properties of the Brazilian quinoa BRS Piabiru. *Food & Function* 11 (4): 2969–2977. <https://doi.org/10.1039/D0FO00055H>

- Slafer GA, Savin R, Sandras VO. 2014. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research* 157: 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.004>
- Valenzuela A RN, Mita T G, Zapana Y FE, Quilla C D, Miranda A R, y Mita C UJ. 2015. Efecto de la germinación y cocción en las propiedades nutricionales de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). *Revista de Investigaciones Altoandinas* 17 (2): 169–172. <file:///C:/Users/ASPIRE/Downloads/Dialnet-EfectoDeLaGerminacionYCoccionEnLasPropiedadesNutri-5169791-1.pdf>
- Villaseñor M HE, Martínez C E, Hortelano SR R, González G M, Zamudio C A, Huerta E J, Espitia R E. 2017. Variabilidad genética y criterios de selección para calidad industrial de trigos introducidos en condiciones de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4: 661–672. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.39>
- Zurita-Silva A, Fuentes F, Zamora P, Jacobsen SE, Schwember AR. 2014. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. *Molecular Breeding* 34: 13–30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023-5>

POTENTIAL USE OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SQUASH SEEDS (*Cucurbita moschata*), PEA PODS (*Pisum sativum*) AND GREEN BEAN (*Phaseolus vulgaris*) IN AGROINDUSTRY 4.0

Selena del Rocío Martínez-Betancourt¹, Erich Dietmar Rössel-Kipping^{1*}, Laura Araceli López-Martínez², Hipólito Ortiz-Laurel³, Gerardo Loera-Alvarado¹, Alejandro Amante-Orozco¹, Víctor Manuel Ruiz-Vera¹

¹ Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí. Iturbide 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México. C. P. 78600.

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Carretera Salinas-Santo Domingo No. 200, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México. C. P. 78600.

³ Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Manuel León, Amatlan de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

* Author for correspondence: edietmar@colpos.mx

ABSTRACT

Castilla squash (*Cucurbita moschata*), pea pods (*Pisum sativum*) and pinto Saltillo green bean (*Phaseolus vulgaris*) seed shells are considered organic wastes due to the lack of knowledge about their physical, nutritional and medicinal characteristics and their relevance in agroindustrial production. The consumption of functional, synthetic and semi-synthetic products increases worldwide, as does the need for research on non-traditional species with agroindustrial potential. The objective of this research was to analyse the physical characteristics of Castilla squash seeds with shells, whole pods of Saltillo pinto green bean, and pea pods, and to transform them into flours to identify their potential use in Agroindustry 4.0. Pea pods showed the greatest width (11.17 mm) and thickness (9.19 mm), the greatest length was found in green bean pods (125.18 mm), while squash seeds showed the lowest values in these three variables. The squash seed flour presented higher internal friction (0.98) and higher external friction on wood (1.32) as did the pea pod flour (1.33) also on wood. In contrast, the mean values of strain percentage by hardness, recovery after work and specimen length showed no statistical difference ($p > 0.05$) between the masses. These flours meet the specifications of the Mexican standard for wheat flour; therefore, they can be used in blends to fortify products or in the manufacture of industrial machines for processing the raw material.

Keywords: *Cucurbita moschata*, *Pisum sativum*, *Phaseolus vulgaris*, physical characteristics, flours.

INTRODUCTION

In 2021, the world population was 7875 million people and is expected to increase by another 2 billion by 2050 (UN, 2021). In Mexico, the population is approximately 130 million, out of which 22 % live in rural areas (INEGI, 2020). The excessive increase in population demands more and more resources, which affects global biodiversity, health and well-being of the population (Diamond, 2006; Goldstein, 2007). Faced with this scenario, there is the need to adapt new technologies for the handling of raw

Citation: Martínez-Betancourt SR, Rössel-Kipping ED, López-Martínez LA, Ortiz-Laurel H, Loera-Alvarado G, Amante-Orozco A, Ruiz-Vera VM. 2022. Potential use of physical characteristics of squash seeds (*Cucurbita moschata*), pea pods (*Pisum sativum*) and green bean (*Phaseolus vulgaris*) in Agroindustry 4.0. *Agrociencia*. 56(7): 1328-1353. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2863>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: May 20, 2022.
Approved: September 18, 2022.
Published in Agrociencia:
December 02, 2022.

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



materials, reduction of inputs in processing and better use of the quality and quantity of edible, non-edible, natural and synthetic products.

The physical characteristics of raw materials are an essential component in the knowledge for the success of processes and their automation; through the design of equipment to handle, transport, process and store products (Ganjloo *et al.*, 2018). The raw material used in the new technologies applied in Agroindustry 4.0 is aimed at creating them with textures and nutrient contents determined, suitable and customized upon consumer profiles (Erbes *et al.*, 2019). The new agroindustrial paradigm focuses on the generation of natural, semi-natural and synthetic foods and biomaterials to meet those goals. To this end, knowledge of the physical characteristics of potential materials is key to the design or selection of suitable machinery, under optimal operation and maintenance. Because the production equipment must operate according to specifications, for a production with a high level of quality and adequate use of technologies to avoid economically significant losses within the transformation processes.

Legume pods and oilseeds can contribute to counteracting health and food security problems, as legumes have high content of energy, protein and complex carbohydrates, while oilseeds are rich in essential fatty acids. Both provide vitamins and minerals, among other nutrients (Galan *et al.*, 2019). The use of these pods and seeds is proposed as an insertion into the global sustainability efforts defined in the fourth industrial revolution and additive manufacturing. Furthermore, they can constitute food and functional options in agroindustrial processes under the 4.0 paradigm to take advantage of the physical characteristics of raw materials in automated production processes. The goal is to make these processes safer, with higher quality, less waste of resources, fewer manufacturing defects and towards the creation of customized products; although still today, they are only used in a traditional way. The objective of this research was to analyse the physical characteristics of Castilla squash (*Cucurbita moschata*) seeds with shells, whole pods of Saltillo pinto green bean (*Phaseolus vulgaris*) and pea pods (*Pisum sativum*); also, to transform them into flours in order to identify their potential of use in the Agroindustry 4.0 paradigm.

MATERIALS AND METHODS

The physical properties of Castilla squash seeds (*Cucurbita moschata* L.), pea pods (*Pisum sativum* L.) and green bean pods of pinto Saltillo green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) were analysed, as well as the flours made from these products (Figure 1). Samples consisted of 1.0 kg of each product, which were collected from crops planted in communities in San Luis Potosi in 2021, to match the harvest of the plots as they reached maturity for market. Castilla squash (*Cucurbita moschata* L.) was sown on March 25 in Zacatón, Villa de Ramos and fruits were recollected on August 19, the same day their seeds were extracted. Meanwhile, in Ejido de Moras, Mexquitic de Carmona, peas (*Pisum sativum* L.) were planted on March 27 and the pods were collected randomly from different plants on June 15. Green beans (*Phaseolus vulgaris* L.) were also sown on March 20 and harvested randomly from different plants on July 22.



Figure 1. Pods of Saltillo pinto green bean (*Phaseolus vulgaris*), pea (*Pisum sativum*) pods and Castilla squash (*Cucurbita moschata*) seeds with shell.

Analyses were performed at the Water-Soil-Plant Laboratory of Campus San Luis Potosí under Colegio de Postgraduados (22° 63' 22" N; 101° 71' 25" W) and at Laboratory 2 of the Coordinación Académica Región Altiplano Oeste (CARAO) under the Universidad Autónoma de San Luis Potosí (22° 38' 28.5" N; 101° 42' 10.0" W).

The size of seeds and pods was determined by measuring their dimensions; length (L), width (W) and thickness (T), from 50 seeds with shells and pods of each species selected at random, measured with a digital calliper to the nearest 0.1 mm (Karlen®, Mexico).

The geometric diameter (D_g) of an individual seed or pod was calculated from the three characteristic dimensions according to the following equation (Mohsenin, 1986):

$$D_g = (L * W * T)^{(1/3)} \quad (1)$$

where: D_g = geometric diameter; L = length; W = width; T = thickness.

The specific surface area (S) was determined by the result of the geometric diameter, with the equation (McCabe *et al.*, 1986):

$$S = \pi (D_g)^2 \quad (2)$$

where: S = specific surface area; $\pi = 3.1416$; D_g = geometric diameter.

The aspect ratio (R) of seeds and pods was calculated from the width and length dimensions (Maduako and Faborode, 1994):

$$R = W/L \times 100 \quad (3)$$

where: R = aspect ratio; W = width; L = length.

Sphericity was determined according to the equation of Mohsenin (1986):

$$\phi = \left(\frac{D_g}{L} \right) \times 100 \quad (4)$$

where: ϕ = sphericity; D_g = geometric diameter; L = length.

The arithmetic mean diameter was calculated from the three characteristic dimensions in the relation of Mohsenin (1986):

$$Da = \left(\frac{L + W + T}{3} \right) \quad (5)$$

where: Da = arithmetic mean diameter; L = length; W = width; T = thickness.

The volume was determined with the following formula (Jain and Bal, 1997):

$$Volumen = \left(\frac{\pi B^2 2L^2}{6(2L - B)} \right) \quad (6)$$

where: $B = (WT)^{1/2}$; L = length; W = width; T = thickness; $\pi = 3.1416$.

To make the flours, the seeds and pods were subjected to a milling process in a laboratory-scale colloid mill (Thomas Scientific®, model Wiley Mini-Mill 3383-L10, 115 V, 60 HZ, USA) with two stationary blades and a four-bladed rotor, in order to obtain flours with a more uniform particle size.

The internal friction (μ_i) was determined with the use of a plastic funnel with a removable bottom lid (Weston®, model W-70945, Mexico), which was filled with the flours, seeds or pods. The lid was then removed, and the flours, seeds and pods were allowed to achieve their natural inclination. The angle of repose was calculated with the radius and height of the mass of the flours (Dutta *et al.*, 1988) by the following equation:

$$\text{Internal friction} = \mu_i = \tan \beta = h/r \quad (7)$$

where: μ_i = internal friction; h = height of the cone formed; r = radius of the cone.

The external friction (μ_e) of the seed and pod flours was determined on a plate of different materials (wood board, glass, tile, plywood and polyethylene plastic board,

galvanized sheet and stainless steel). For this purpose, 40 g of flour was placed on the plate and gradually tilted until complete sliding of the sample was achieved. In this position, angle degrees were taken with a plastic protractor (ULINE® model H-5648, Mexico), at the height at which the table was placed, according to the following equation:

$$\text{External friction} = \mu_e = \tan\alpha \quad (8)$$

where: μ_e = external friction; $\tan\alpha$ = tilt angle.

Electrical conductivity was measured with a digital hook multi-meter (Truper®, model MUT-202, Mexico) in a solution of flour and distilled water or deionized water in a 30:70 ratio. For this purpose, 15 g of flour were dissolved in 35 mL of water; then, the multi-meter terminals were placed with a separation of 5 cm, for 30 s.

The particle size analysis of the seed flours of Castilla squash (*C. moschata*), green Saltillo pinto green bean pods (*P. vulgaris*) and pea pods (*P. sativum*) was carried out using a shaker (Ro-Tap®, W. S. Tyler™, USA). For this purpose, 200 g of each flour were individually placed in a set of sieves (Alcón®, Mexico) and shaken for 5 min. Finally, the flour fractions retained in each sieve were weighed. This operation was performed in duplicate.

The particle size index was determined according to the method reported by Bedolla and Rooney (1984), with the following formula:

$$\text{PSI} = \sum [(FN_0M_i) (\% \text{PSD}_i) + \dots + (FN_0M_n) (\% \text{PSD}_n)] \quad (9)$$

where: PSI = particle size index, FN_0M= mesh number factor; PSD= particle size distribution number factor (%).

Each factor used depends on the serial number on the sieves U.S. (factor 0.2 for No. 20 mesh; 0.4 No. 40 mesh; 0.6 No. 60 mesh; 0.8 No. 80 mesh; 1.0 No. 100 mesh) and the retention percentage for each mesh was obtained as described in the particle size distribution analysis.

The morphological properties of the flour particles were determined by digital image analysis. For this purpose, flour samples at each mesh size were placed on a digital microscope (MUSTOOL®, 7-inch MT315 with Dual lens, HD, China) with sheets of millimetre paper as background field. Morphological variables were measured after manually delimiting the particle profile in the digital image with the Image J program (64-bit version 1.8.0_172, licensed as open access).

The texture of the doughs made of each flour was determined with a texture analyser (Brookfield®, model CT3, China), for which a mixture of 4.5 g of flour and 2.5 mL of distilled water was prepared. The mixture was kneaded for 5 min, then moulded by hand into a cube shape of approximately 2 cm per side. Texture was determined based on hardness (g), strain according to hardness (mm), percentage of strain according to

hardness (%), hardness finished work (mJ), recovery strain (mm), recovery work (mJ), total work (mJ), adhesive strength (g), adhesiveness (mJ), resilience and sample length (mm).

The dough firmness of each flour was determined with a digital penetrometer (GY-4, China) to the nearest ± 1 %, using the cylindrical tip #2 of 7.9 mm diameter, with a 10 mm depth of insertion of the pressure head.

Statistical analysis

Data were analysed in R-project® (4.1.1) of the RStudio® (2021.09.0) interface, both programs licensed as open access, to compare the physical characteristics (n = 50 for dimensions and shape, n = 10 for internal and external friction, and n = 3 for the rest of the determinations) of seeds of Castilla squash (*C. moschata*), Saltillo pinto green bean (*P. vulgaris*) pods, and pea (*P. sativum*) pods; with the species as the source of variation for each of the variables studied. Comparison of means was performed with Tukey's test ($p \leq 0.05$). The value of these comparisons is referential, as part of the physical characterization to determine the potential utility of the raw material.

RESULTS AND DISCUSSION

According to the analysis of variance, the dimensions of seeds of Castilla squash, pea pods and green bean showed significant difference ($p < 0.001$). Pea pods were wider and thicker than squash seed and green bean pods (Table 1). While green bean pods were longer than pea pods and squash seeds. Green bean pod showed greater volume (301.13 mm³), arithmetic mean diameter, specific surface area and geometric diameter compared to squash seed and pea pod. While squash seed presented higher aspect ratio (45 %) and sphericity compared to pea pod and green bean pod (Table 1). Castilla squash seed dimensions are within the values reported by Delgado-Paredes *et al.* (2014) on *C. moschata* variety Chuyan with averages of 17.60 and 8.80 mm in length and width, respectively. Likewise, Chí-Sánchez *et al.* (2020) reported values of 8.22 to 9.10 mm in width and 1.80 to 2.70 mm in thickness for the variety *C. moschata* Duch.

Table 1. Average dimensions and shape of seeds of Castilla squash, pea pods and green beans.

Evaluated product	Squash seed	Pea pod	Green bean pod
Width (mm)	8.33	11.71	9.28
Thickness (mm)	2.38	9.19	8.47
Length (mm)	18.47	77.66	125.18
Geometric diameter (mm)	7.13	20.26	21.41
Specific surface area (mm ²)	160.06	1291.92	1441.25
Aspect ratio (%)	45.24	15.14	7.45
Sphericity (%)	38.69	26.15	17.15
Arithmetic mean diameter (mm)	9.72	32.85	47.64
Volume (mm ³)	24.39	225.79	301.13

Whereas Cáseres *et al.* (2010) found 7.40 mm width and 11.50 mm length in the variety of *C. moschata* Duch. ex Lam.

The dimensions of green bean pods were similar to bean pods, with value ranges of 5.54-6.90 and 111.19-130.70 mm in width and length, respectively (Bravo-Delgado *et al.*, 2021). Meanwhile, Pumalpa *et al.* (2020) reported values for bean pods of 115 and 12 mm in length and width, respectively. Lépiz *et al.* (2010) obtained values of 120 and 11 mm in length and width, respectively, for domesticated beans. Also, Yalçın *et al.* (2007) reported values for pea pods similar to those of this research (7.80 mm, 6.41 mm and 5.55 mm in length, width and thickness).

In contrast, the shape values found, such as the low aspect ratio indicate that the seeds of Castilla squash, pea pods and green beans will be able to slide during transport on flat surfaces. The geometric diameter considers the volume of the grain or seed and heat transfer is proportional to the specific surface area (Wilhelm *et al.*, 2004). These physical properties of size and shape depend on the moisture content which mainly affects the geometric diameter.

Difference ($p \leq 0.001$) was found in the internal friction, external friction and electrical conductivity of squash seed, pea pod and green bean flours. The squash seed flour had higher internal friction (0.98) than the pea and green bean pod flours. While squash seed, pea pod and green bean flours presented higher external friction on wood. In tile, on the other hand, squash seed flours and pea pods presented lower external friction. The squash seed flour presented higher electrical conductivity in both deionized and distilled water compared to the other two flours (Table 2).

Table 2. Values of form in solid and liquid medium of Castilla squash seed, pea pods and green beans.

Evaluated product	μ_i (-)	Material	μ_e (-)	Medium for dissolution	Electric conductivity (k Ω)
Green bean pod	0.81±0.01b [†]	Steel sheet	1.12±0.04f	Deionized water	28.97±0.60c
		Wood on board	1.33±0.06a		
		Plastic board	1.21±0.04bcde	Distilled water	
		Glass	1.23±0.06bc		
Pea pod	0.80±0.01b	Tile	1.21±0.04bcde	Deionized water	28.16±1.17c
		Steel sheet	1.22±0.05bcd		
		Wood on board	1.27±0.04ab	Distilled water	
		Plastic board	1.18±0.04cdef		
		Glass	1.16±0.04def		
Squash seed	0.98±0.05a	Tile	0.99±0.04g	Deionized water	33.86±0.80b
		Steel sheet	1.17±0.02cdef		
		Wood on board	1.32±0.04a	Distilled water	
		Plastic board	1.15±0.06ef		
		Glass	1.04±0.04g		
		Tile	1.02±0.03g	Distilled water	37.04±0.51a

[†]Means with different letters indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$).

In the results of the internal friction tests, the flow of the flours is limited; according to Barbosa-Cánovas *et al.* (2005) an internal friction close to 0.35 indicates free flowing, from 0.35–0.45 somewhat cohesive, 0.45–0.55 cohesive (loss of free flowing) and for values greater than 0.55 the flow is limited. The internal friction values are different from those found by other authors. Rössel-Kipping *et al.* (2018) reported internal friction values (0.56) of creole Castilla squash seed flours with shells. While Ganjloo *et al.* (2018) found values for pea seeds of 2.70 (40.62° at 75.15 % moisture) and 1.17 (20.50° at 15.21 % moisture). The difference is due to the fact that internal friction is determined by the size, shape, volume, density and orientation of the particles that make up the flours or seeds. The main variation in their performance is due to moisture content (Mohsenin, 1986), as well as to the shape and material of discharge hoppers, vibration and pressure of the flours.

The external friction results showed that tile and glass were the materials that presented the least external friction to the Castilla squash seed flours, pea pods and green beans, compared to the other materials. Results of this investigation were different from those reported by Rössel-Kipping *et al.* (2018) who indicated external friction values, for the flour made of squash seed with shells, of 0.59 and 0.81 on glass and wood, respectively. Also, Ganjloo *et al.* (2018) obtained with flour of pea seeds friction values as follows: in rubber (0.388–0.413), aluminium (0.292–0.351), stainless steel (0.270–0.311) and galvanized iron sheet (0.360–0.409). The differences between these recorded values of the angle of external friction are probably due to the moisture content that generates greater adhesion and cohesion among the flour particles, also to the roughness of contact surfaces, size, shape, roughness, and texture of the particles (Mohsenin, 1986).

In electrical conductivity, the difference of pea pod flour with distilled water is related to the total concentration of ionized substances and organic compounds in the water, as well as the temperature at which the measurement is made (Valdivia-Medina *et al.*, 2010). Furthermore, electrical conductivity depends on the resistance, the geometry used to contain the feed, age, environmental conditions, crop management and the characteristics of each species.

The sieving results show that squash seed flour had higher retention percentage in the size range between 0.180 mm and 0.300 mm, while pea pod flour showed higher size percentage between 0.075 mm and 0.150 mm, and green bean pod flour was higher at 0.300 mm (Figure 2).

The red line in Figure 2 shows the maximum allowable limit for wheat flour classification according to Mexican Standard (NMX-F-007-1982). Based on the sieving, the three flours meet the particle size conditions established by the standard, 73 % is the minimum retention of the 0.297 and 0.149 mm mesh opening fractions; equivalent to # 50 and # 100 Alcón® (Mexico). The mesh # 50 used for the analysis in this study is slightly more open (0.300 mm). Flours made of pear cactus, squash seeds, pea pods and green beans are classified and designated according to the “Mexican Standard for Wheat Flour” as Grade III and II flours, suitable for making cookies and soup pastes.

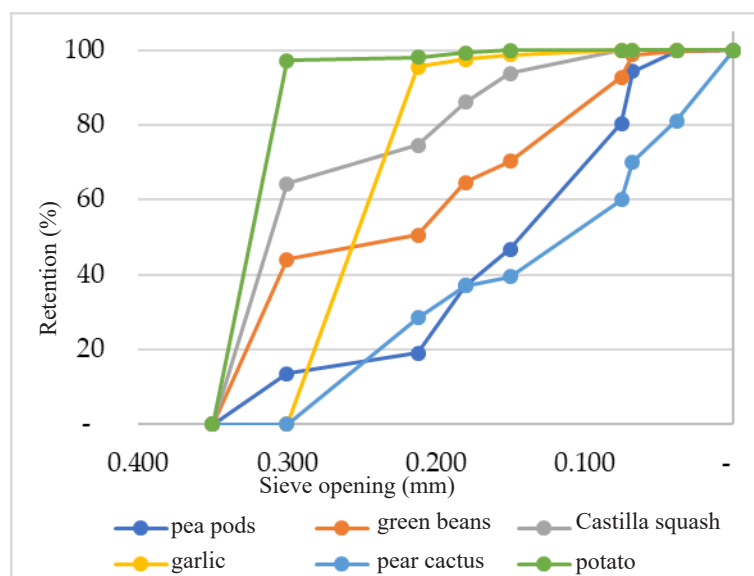


Figure 2. Sieve comparison of flours made of Castilla squash seeds (*Cucurbita moschata*), pea pods (*Pisum sativum*) and green beans (*Phaseolus vulgaris*), with garlic (*Allium sativum*), pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) and potato (*Solanum tuberosum*) flours as reference.

These flours showed a lower percentage of sample in the tray, which corresponds to the finest fraction.

The particle size index showed differences ($p \leq 0.001$); pea pod flour obtained the highest index (158.97), followed by the other flours; green bean pod flour, squash seed flour, garlic flour, cactus flour and lastly, potato flour. According to Gómez *et al.* (1987) high particle size index values indicate a finer grained flour, which is related to more cohesive doughs; pea, pear cactus and green bean flours are finer grained flours. The particle size of the flour determines its intended use; for example, flour for tostadas and tamales requires a coarser particle size than flour for tortillas. Factors affecting the average particle size of flour are grain hardness, moisture, amount of alkali used, resting time, mill speed and flour sifting controls. Currently, there is very little information on the sieving process of flours from squash seeds, pea pods and green beans.

According to microscopic observations, the flours at particle sizes of 0.030, 0.038, 0.058, 0.075 and 0.300 mm showed no differences ($p > 0.05$). While at sizes 0.150, 0.180 and 0.212 mm, flour particles presented differences ($p \leq 0.05$) among flours because the dimensions depend on particle orientation (Table 3).

In the texture profile analysis for the doughs made of flours of squash seeds, pea pods and green beans, the hardness of the green beans doughs was higher than those of squash seeds and wheat doughs ($p \leq 0.05$). The percentage of deformation according to hardness and sample length did not show differences ($p > 0.05$) among the doughs (Table 4).

Table 3. Dimensions of flours made of Castilla squash seeds, pea pods and green beans.

Evaluated product	Particle size (mm)	Area (mm ²)	Perimeter (mm)	Length (mm)	Width (mm)
Green beans flour	0.030	0.004±0.001a [†]	0.258±0.046a	0.085±0.014a	0.034±0.002b
	0.038	0.003±0.002b	0.256±0.055b	0.092±0.003b	0.066±0.011c
	0.058	0.010±0.002c	0.418±0.032c	0.157±0.020c	0.097±0.011d
	0.075	0.022±0.004d	0.636±0.087d	0.251±0.041d	0.130±0.007e
	0.150	0.066±0.009ef	1.010±0.056f	0.307±0.017f	0.256±0.020f
	0.180	0.161±0.041g	1.695±0.230h	0.666±0.149h	0.331±0.016g
	0.300	0.192±0.047i	1.954±0.098j	0.529±0.025i	0.424±0.0901i
Pea pods flour	0.212	0.165±0.025j	1.720±0.109l	0.590±0.026k	0.359±0.027j
	0.030	0.005±0.002a	0.311±0.029a	0.118±0.016a	0.090±0.010a
	0.038	0.004±0.001b	0.252±0.036b	0.087±0.003b	0.064±0.017c
	0.058	0.013±0.004c	0.454±0.056c	0.157±0.029c	0.111±0.022d
	0.075	0.027±007d	0.662±0.092d	0.211±0.031d	0.131±0.022e
	0.150	0.091±0.029e	1.320±0.148e	0.523±0.037e	0.253±0.025f
	0.180	0.137±0.080gh	1.582±0.610hi	0.572±0.327h	0.303±0.017g
Squash seeds flour	0.300	0.177±0.031i	1.852±0.282j	0.759±0.179i	0.318±0.009i
	0.212	0.260±0.064j	2.021±0.144k	0.720±0.034j	0.497±0.067j
	0.075	0.017±0.006d	0.518±0.072d	0.180±0.016d	0.118±0.035e
	0.150	0.026±0.006f	0.664±0.093g	0.203±0.005g	0.160±0.029f
	0.180	0.027±0.004h	0.732±0.074i	0.259±0.015h	0.136±0.020h
	0.300	0.154±0.028i	1.652±0.128j	0.533±0.033i	0.385±0.008i

[†]Means with different letters indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$); $n = 3$.

Results of the rheological, mechanical, plastic and viscoelastic properties of the doughs made of squash seeds are equal to those of the wheat dough, except resilience which had significant differences ($p \leq 0.05$). While pea dough did not show significant differences ($p > 0.05$) with wheat dough in the following eight properties: hardness, deformation according to hardness, percentage of deformation according to hardness, recoverable deformation, recovery after work, adhesive strength, adhesiveness and sample length. The firmness value achieved by the dough made of green beans (10.09 N ± 0.52) was the highest compared to the rest of the doughs made of pea pods and squash seeds.

This difference in firmness is probably due to the moisture content, texture, structure and shape of the dough particles. Furthermore, the endosperm hydrates and plasticizes when it comes in contact with water, which causes the work (energy) during compression to be absorbed causing a more pronounced deformation of the biomaterial; therefore, the rheological properties of doughs are critical in food manufacturing (Barak *et al.*, 2013). The doughs exhibit viscoelastic and plastic behaviour due to the combined effect of the rheological, plastic, frictional and structure properties of a viscous fluid and an elastic solid; all of them are caused by the combination of flours and water (Upadhyay *et al.*, 2012).

Table 4. Texture of the doughs made with flours of Castilla squash seeds, pea pods and green beans.

Product /Property	Green beans	Pea pods	Squash seeds	Wheat flour
Hardness (g)	1397.90±549.40a [†]	854.80±390.68ab	374.38±73.38b	144.17±8.96b
Defomation according to hardness (mm)	9.16±1.16ab	7.13±2.29b	9.98±0.04a	9.94±0.04ab
Defomation according to hardness (%)	48.82±7.53a	41.14±17.16a	55.65±5.70a	57.73±1.72a
Finished hardness work (mJ)	87.73±31.18a	55.00±22.26 ab	22.10±4.39abc	6.89±0.39c
Recoverable defomation (mm)	0.79±0.31a	0.73±0.14a	0.45±0.07a	0.89±0.13a
Recoverable work (mJ)	4.03±1.08a	1.70±1.45b	0.52±0.10b	0.42±0.04b
Total work (mJ)	91.76±32.25a	56.69±23.23ab	22.62±4.32bc	7.31±0.37c
Strength adhesiveness (g)	77.00±72.48ab	18.70±5.31b	101.88±24.91a	19.83±5.75ab
Adhesivity (mJ)	2.61±1.37a	1.13±0.91a	1.50±1.26a	0.37±0.08a
Resilience	0.04±0.01ab	0.03±0.02b	0.03±0.01b	0.06±0.01a
Sample length (mm)	18.83±0.61a	18.01±2.36a	18.06±1.76a	17.21±0.44a
Firmness (N)	10.09±0.52a	3.09±0.23b	1.50±0.23c	NA

[†]Means with different letters indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$). NA: not determined.

CONCLUSIONS

The physical characteristics of flours from squash seeds, pea pods and green beans showed that their rheological, plastic and viscoelastic properties were not affected by the shells. The particle size of the flours complies with NMX-F-007-1982 for use in the manufacture of cookies and soup pastes, among others.

This information stimulates the use of organic waste without threatening the sustainability of food systems. Within the current 4.0 paradigm, to get to know the physical properties of seeds can promote their inclusion in technological packages for regions with little development and innovation. This would improve Mexico's response to global demand for food and biomaterials with higher and better production levels that add value to agricultural by-products.

ACKNOWLEDGMENTS

To the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, Mexico) for the scholarship awarded to Selena del Rocío Martínez-Betancourt. To the Coordinación Académica Región Altiplano Oeste (CARAO) from the Universidad Autónoma de San Luis Potosí for providing access to their facilities to perform a part of the laboratory analyses.

REFERENCES

- Barak S, Mudgil D, Khatkar BS. 2013. Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties. *LWT-Food Science and Technology* 51 (1): 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.011>
- Barbosa-Cánovas GV, Ortega-Rivas E, Juliano P, Yan H. 2005. Physical properties, processing and functionality: Particle Properties. *In: Food Powders. Food Engineering Series.* Springer: Boston, MA, USA, pp: 19–54. https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0_2
- Bravo-Delgado HR, Ortega M ML, Loeza-Corte JM, Díaz-López E. 2021. Comportamiento ecofisiológico de tres cultivares de ejote *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae) bajo un clima de transición templado a seco. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 24: 1–7. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.331>
- Cáseres E, Piña K, Berrío T, Leal N. 2010. Comparación morfológica de frutos y semillas de ayama (*Cucurbita moschata* Duch. ex Lam). *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 28: 32–36.
- Chí-Sánchez FA, Alvarado-López CJ, Cristóbal-Alejo J, Reyes-Ramírez A. 2020. Características morfológicas y determinación de minerales por μ -XRF en fruto de calabaza (*Cucurbita moschata* Duch). *Agrociencia* 54 (5): 683–690. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i5.2125>
- Delgado-Paredes GE, Rojas-Idrogo C, Sencie-Tarazona A, Vásquez-Núñez L. 2014. Caracterización de frutos y semillas de algunas cucurbitáceas en el norte del Perú. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37 (1): 7–20.
- Diamond, J. 2006. Colapso: porqué unas sociedades perduran y otras desaparecen. Editorial Arte S.A. Caracas, Venezuela. 747 p.
- Dutta SK, Nema VK, Bharddwaj RK. 1988. Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research* 39: 259–268. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(88\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0021-8634(88)90147-3)
- Erbes A, Gutman G, Lavarello P, Robert V. 2019. Industria 4.0: oportunidades y desafíos para el desarrollo productivo de la provincia de Santa Fe. *In: Documentos de Proyectos (LC/TS.2019/80).* Girándola S, Abeles M, Ciciliani A (coords.); Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Chile. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/44954/S1901011_es.pdf (Retrieved: June 2022).
- Galan P, Babio N, Salas-Salvadó J. 2019. Nutri-Score: el logotipo frontal de información nutricional útil para la salud pública de España que se apoya sobre bases científicas. *Nutrición Hospitalaria* 36 (5): 1213–1222.
- Ganjloo A, Bimakr M, Zarringhalami S, Jalili-Safaryan M, Ghorbani M. 2018. Moisture-dependent physical properties of green peas (*Pisum sativum* L.). *International Food Research Journal* 25 (3): 1246–1252.
- Goldstein I. 2007. Reseña “Colapso: por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen (de Jared Diamond)”. *Revista Geográfica Venezolana* 48 (2): 311–318.
- Gómez MH, Rooney LW, Waniska RD, Pflugfelder RL. 1988 Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. *Cereal Foods World* 32 (5): 372–377.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2020. Población rural y urbana. http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema_P (Retrieved: March 2022).
- Jain RK, Bal S. 1997. Properties of Pearl millet. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66 (2): 85–91. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0119>
- Lépiz I R, López AJ, Sánchez G JJ, Santacruz-Ruvalcaba JJ, Nuño R R, Rodríguez GE. 2010. Características morfológicas de formas cultivadas, silvestres e intermedias de frijol común de hábito trepador. *Revista Fitotecnia Mexicana.* 33 (1): 21–28.
- Maduako JN, Faborode MO. 1994. Characterization of the breaking behaviour of cocoa pods. *Journal of Agricultural Engineering and Resources* 59 (2): 89–96.
- McCabe WL, Smith JC, Harriott P. 1993. Properties, handling, and mixing of particulate solids. *In: Unit Operations of Chemical Engineering.* 5th Edition. McGraw-Hill Chemical Engineering Series International Editions: New York, NY, USA. pp: 927–959.
- Mohsenin NN. 1986. Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics, and mechanical properties. Gordon and Breach Science Publishers. 2nd Edition. New York, NY, USA. 891 p.

- NMX-F-007-1982 (NORMA MEXICANA NMX-F-007-1982). 1982. Harina de trigo. http://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-F-007-1982_harina_de_trigo.pdf. (Retrieved: May 2021).
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2021. Población mundial. <https://www.unfpa.org/es/data/world-population-dashboard> (Retrieved: May 2022).
- Pumalpa M D, Cantaro S H, Estrada C R, Huaranga J A. 2020. Caracterización fenotípica y agronómica de líneas avanzadas de frijol voluble (*Phaseolus vulgaris*) resistentes a virus en Perú. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales (RIAR)*. 7 (1): 7–20.
- Rössel-Kipping D, Ortiz-Laurel H, Amante-Orozco A, Durán-García HM, López-Martínez LA. 2018. Características físicas y químicas de la semilla de calabaza para mecanización y procesamiento. *Nova Scientia* 10 (21): 61–77. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1467>
- Upadhyay SK, Singh JS, Saxena AK, Singh DP. 2012. Impact of PGPR inoculation on growth and antioxidant status of wheat under saline conditions. *Plant Biology* 14 (4): 605–611. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00533.x>
- Valdivia-Medina RY, Pedro-Valdés S, Laurel-Gómez M. 2010. Agua para uso en laboratorios. Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología. Ciudad de La Habana, Cuba. *Boletín Científico Técnico INIMET* 1: 3–10.
- Wilhelm WW, Johnson JMF, Hatfield JL, Voorhees WB, Linden DR. 2004. Crop and soil productivity response to corn residue removal: A literature review. *Agronomy Journal* 96 (1): 1–17. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1000a>
- Yalçın I, Özarıslan C, Akbař T. 2007. Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. *Journal of Food Engineering* 79 (2): 731–735. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.039>

USO POTENCIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE SEMILLAS DE CALABAZA (*Cucurbita moschata*), VAINAS DE CHÍCHARO (*Pisum sativum*) Y EJOTE (*Phaseolus vulgaris*) EN LA AGROINDUSTRIA 4.0

Selena del Rocío Martínez-Betancourt¹, Erich Dietmar Rössel-Kipping^{1*}, Laura Araceli López-Martínez², Hipólito Ortiz-Laurel³, Gerardo Loera-Alvarado¹, Alejandro Amante-Orozco¹, Víctor Manuel Ruiz-Vera¹

¹ Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí. Iturbide 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México. C. P. 78600.

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Carretera Salinas-Santo Domingo No. 200, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México. C. P. 78600.

³ Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Manuel León, Amatlan de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

* Autor para correspondencia: edietmar@colpos.mx

RESUMEN

Las cáscaras de semillas de calabaza de Castilla (*Cucurbita moschata*), vainas de chícharo (*Pisum sativum*) y ejote de frijol pinto Saltillo (*Phaseolus vulgaris*) se consideran desechos orgánicos debido al desconocimiento de sus características físicas, nutricionales, medicinales y su relevancia en producción agroindustrial. El consumo de productos funcionales, sintéticos y semisintéticos aumenta a nivel mundial, y también la necesidad de realizar investigaciones en especies no tradicionales con potencial agroindustrial. El objetivo de esta investigación fue analizar las características físicas de semillas de calabaza de Castilla con cáscara, vainas enteras de ejote de frijol pinto Saltillo y de chícharo, y transformarlas en harinas para identificar su uso potencial en Agroindustria 4.0. Las vainas de chícharo presentaron mayor ancho (11.17 mm) y grosor (9.19 mm), el largo mayor fue encontrado en las vainas de ejote (125.18 mm), mientras que las semillas de calabaza presentaron los valores más bajos en estas tres variables. La harina de semillas de calabaza presentó mayor fricción interna (0.98) y mayor fricción externa sobre madera (1.32) al igual que la harina de vainas de chícharo (1.33) sobre ese material. En contraste, los valores medios del porcentaje de deformación según dureza, el trabajo recuperable y la longitud de la muestra no presentaron diferencia estadística ($p > 0.05$) entre las masas. Estas harinas cumplen con las especificaciones de la norma mexicana para la harina de trigo; por lo tanto, se pueden utilizar en mezclas para fortificar los productos o para la elaboración de máquinas de industrias para el procesamiento de la materia prima.

Palabras clave: *Cucurbita moschata*, *Pisum sativum*, *Phaseolus vulgaris*, características físicas, harinas.

INTRODUCCIÓN

En 2021 la población mundial fue de 7875 millones de personas y se espera que para el año 2050 aumente otros 2000 millones (ONU, 2021). En México, la población es de aproximadamente 130 millones, de la cual el 22 % vive en el medio rural (INEGI,

Citation: Martínez-Betancourt SR, Rössel-Kipping ED, López-Martínez LA, Ortiz-Laurel H, Loera-Alvarado G, Amante-Orozco A, Ruiz-Vera VM. 2022. Uso potencial de las características físicas de semillas de calabaza (*Cucurbita moschata*), vainas de chícharo (*Pisum sativum*) y ejote (*Phaseolus vulgaris*) en la agroindustria 4.0. *Agrociencia*. 56(7): 1328-1353. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2863>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: May 20, 2022.
Approved: September 18, 2022.
Published in *Agrociencia*:
December 02, 2022.

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



2020). El incremento excesivo de la población demanda cada vez más recursos lo cual afecta a la biodiversidad del planeta, la salud y el bienestar de la población (Diamond, 2006; Goldstein, 2007). Ante este panorama, surge la necesidad de adaptar nuevas tecnologías para el manejo de las materias primas, reducción de insumos en el procesamiento y el mejor aprovechamiento de la calidad y cantidad de productos alimenticios, no alimenticios, naturales y sintéticos.

Las características físicas de las materias primas son un componente esencial en el conocimiento para el éxito de procesos y su automatización; por medio del diseño de equipos para manipular, transportar, procesar y almacenar productos (Ganjloo *et al.*, 2018). La materia prima utilizada en las nuevas tecnologías que se aplican en la Agroindustria 4.0 se dirige a crearlos con texturas y contenidos de nutrientes determinados, adecuados y personalizados a perfiles de consumidor (Erbes *et al.*, 2019). El nuevo paradigma agroindustrial se enfoca en la generación de alimentos y biomateriales, naturales, seminaturales y sintéticos, que permitan cumplir esas metas. Para ello es clave el conocimiento de las características físicas de los materiales potenciales, para el diseño o selección de maquinaria adecuada, bajo un funcionamiento y mantenimiento óptimos. Debido a que el equipo de producción debe operar de acuerdo con especificaciones, para una producción con un alto nivel de calidad y uso adecuado de tecnologías para evitar pérdidas económicamente significativas en los procesos de transformación.

Las vainas de leguminosas y semillas de oleaginosas pueden contribuir a contrarrestar los problemas de salud y de seguridad alimentaria, ya que las leguminosas tienen un alto contenido energético, proteico y de carbohidratos complejos; mientras que las oleaginosas son ricas en ácidos grasos esenciales. Ambas aportan vitaminas y minerales, entre otros nutrientes (Galan *et al.*, 2019). El uso de estas vainas y semillas se propone como inserción en los esfuerzos globales de sostenibilidad definidos en la cuarta revolución industrial y en la fabricación aditiva. Además, pueden constituir opciones alimenticias y funcionales en los procesos agroindustriales bajo el paradigma 4.0 para aprovechar las características físicas de las materias primas en procesos productivos automatizados. La meta es hacer estos procesos más seguros, de mayor calidad, con menor pérdida de los recursos, menos defectos de fabricación y hacia la creación de productos personalizados; aunque aún hoy en día, solo se utilizan de manera tradicional. El objetivo de esta investigación fue analizar las características físicas de semillas de calabaza de Castilla (*Cucurbita moschata*) con cáscara, vainas enteras de ejote de frijol pinto Saltillo (*Phaseolus vulgaris*) y de chícharo (*Pisum sativum*), y transformarlas en harinas para identificar su uso potencial en agroindustria 4.0.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron las propiedades físicas de las semillas de calabaza de Castilla (*Cucurbita moschata* L.), vainas de chícharo (*Pisum sativum* L.) y vainas de ejote de frijol pinto Saltillo (*Phaseolus vulgaris* L.) y de las harinas elaboradas con estos productos (Figura 1). Las muestras consistieron en 1.0 kg de cada producto, las cuales se colectaron de los cultivos sembrados en comunidades de San Luis Potosí en 2021, para coincidir con



Figura 1. Vainas de ejote de frijol pinto Saltillo (*Phaseolus vulgaris*), vainas de chícharo (*Pisum sativum*) y semillas de calabaza de Castilla (*Cucurbita moschata*) con cáscara.

la cosecha de las parcelas al satisfacer su madurez para el mercado. La calabaza de Castilla (*Cucurbita moschata*L.) se sembró el 25 de marzo en Zacatón, Villa de Ramos y los frutos se recolectaron el 19 de agosto, mismo día en que se extrajeron sus semillas. Mientras que, en el Ejido de Moras, Mexquitic de Carmona, se sembró el chícharo (*Pisum sativum*L.) el 27 de marzo y las vainas se recolectaron al azar de diferentes plantas el 15 de junio. Se sembró también el frijol para ejote (*Phaseolus vulgaris* L.) el 20 de marzo y su cosecha se realizó al azar de diferentes plantas el 22 de julio.

Los análisis se hicieron en el Laboratorio de Agua-Suelo-Planta del Campus San Luis Potosí del Colegio de Postgraduados (22° 63' 22" N; 101° 71' 25" O) y en el Laboratorio 2 de la Coordinación Académica Región Altiplano Oeste (CARAO) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (22°38'28.5" N y 101°42'10.0" O).

El tamaño de las semillas y vainas se determinó con la medición de sus dimensiones; largo (L), ancho (W) y grosor (T), a partir de 50 semillas con cáscara y vainas de cada especie seleccionadas al azar, medidas con calibrador digital con aproximación a 0.1 mm (Karlen®, México).

El diámetro geométrico (D_g) de una semilla o vaina individual se calculó a partir de las tres dimensiones características, de acuerdo con la siguiente ecuación (Mohsenin, 1986):

$$D_g = (L * W * T)^{(1/3)} \quad (1)$$

donde: D_g = diámetro geométrico; L = largo; W = ancho; T = grosor.

El área superficial específica (S) se determinó por el resultado del diámetro geométrico, con la ecuación (McCabe *et al.*, 1986):

$$S = \pi (D_g)^2 \quad (2)$$

donde: S = área superficial específica; $\pi = 3.1416$; D_g = diámetro geométrico.

La relación de aspecto (R) de las semillas y vainas se calculó a partir de las dimensiones ancho y largo (Maduako y Faborode, 1994):

$$R = W/L \times 100 \quad (3)$$

donde: R = relación de aspecto; W = ancho; L = largo.

La esfericidad se determinó de acuerdo con la ecuación de Mohsenin (1986):

$$\phi = \left(\frac{D_g}{L} \right) \times 100 \quad (4)$$

donde: ϕ = esfericidad; D_g = diámetro geométrico; L = largo.

El diámetro medio aritmético se calculó a partir de las tres dimensiones características en la relación de Mohsenin (1986):

$$Da = \left(\frac{L + W + T}{3} \right) \quad (5)$$

donde: Da = diámetro medio aritmético; L = largo; W = ancho; T = grosor.

El volumen se determinó con la fórmula siguiente (Jain y Bal, 1997):

$$Volumen = \left(\frac{\pi B^2 2L^2}{6(2L - B)} \right) \quad (6)$$

donde: $B = (WT)^{1/2}$; L = largo; W = ancho; T = grosor; $\pi = 3.1416$.

Para elaborar las harinas, se sometió a las semillas y vainas a un proceso de molienda en un molino coloidal a escala de laboratorio (Thomas Scientific®, modelo Wiley Mini-Mill 3383-L10, 115 V, 60 HZ, EE. UU) de dos cuchillas estacionarias y un rotor con cuatro filos, con el fin de obtener harinas con un tamaño de partícula más uniforme. La fricción interna (μ_i) se determinó con el uso de un embudo de plástico con tapa inferior removible (Weston®, modelo W-70945, México), el cual se llenó con las harinas, semillas o vainas. Luego se quitó la tapa y se permitió a las harinas, semillas y vainas

conseguir su inclinación natural. El ángulo de reposo se calculó con el radio y la altura de la masa de las harinas (Dutta *et al.*, 1988) en la ecuación siguiente:

$$\text{Fracción interna} = \mu_i = \tan \beta = h/r \quad (7)$$

donde: μ_i = fricción interna; h = altura del cono formado; r = radio del cono.

La fricción externa (μ_e) de las harinas semillas y vainas se determinó sobre una placa de diferentes materiales (madera en tabla, cristal, azulejo, triplay y tablero de plástico de polietileno, chapa galvanizada y acero inoxidable). Para ello se colocaron 40 g de harina sobre la placa y se inclinó gradualmente hasta lograr el deslizamiento completo de la muestra. En esta posición se tomó la medida del ángulo con un transportador de plástico (ULINE® modelo H-5648, México), a la altura en la cual quedó la tabla, según la ecuación siguiente:

$$\text{Fricción externa} = \mu_e = \tan \alpha \quad (8)$$

donde: μ_e = fricción externa; $\tan \alpha$ = ángulo de inclinación.

La conductividad eléctrica se midió con un multímetro digital de gancho (Truper®, modelo MUT-202, México) en una solución de harina y agua destilada o agua desionizada en una relación 30:70. Para ello se disolvieron 15 g de harina en 35 mL de agua; después, las terminales del multímetro se colocaron con una separación de 5 cm, durante 30 s.

El análisis granulométrico de las harinas de las semillas de calabaza de Castilla (*C. moschata*), vainas de frijol pinto Saltillo verde (*P. vulgaris*) y vainas de chícharo (*P. sativum*) se realizó con un agitador (Ro-Tap®, W. S. Tyler™, EE. UU). Para ello, 200 g de cada harina e individualmente se colocaron en un juego de tamices (Alcón®, México) y se agitaron durante 5 min. Por último, se pesaron las fracciones de harinas retenidas en cada tamiz. Esta operación se realizó por duplicado.

El índice del tamaño de partícula se determinó de acuerdo con el método reportado por Bedolla y Rooney (1984), con la fórmula siguiente:

$$\text{ITP} = \sum [(FN_0M_i) (\%DTP_i) + \dots + (FN_0M_n) (\%DTP_n)] \quad (9)$$

donde: ITP = índice del tamaño de partícula; FN_0M= factor de número de malla; DTP= distribución del tamaño de partícula (%).

Cada factor utilizado depende del número de la serie en los tamices U.S. (el factor 0.2 para la malla No. 20; 0.4 malla No. 40; 0.6 malla No. 60; 0.8 malla No. 80; 1.0 malla No. 100) y el porcentaje de retención de cada malla se obtuvo del modo descrito en el análisis de distribución del tamaño de partícula.

Las propiedades morfológicas de las partículas de harinas se determinaron a través de análisis de imágenes digitales. Para ello, se colocaron muestras de harina en cada tamaño de malla en un microscopio digital (MUSTOOL[®], MT315 de 7 pulgadas con lente Dual, HD, China) con hojas de papel milimétrico como fondo. Las variables morfológicas se midieron a través de la delimitación manual de la vista de la partícula en la imagen digital con el programa Image J (64-bit versión 1.8.0_172, con licencia de acceso abierto).

La textura de las masas hechas con cada harina se determinó con un analizador de textura (Brookfield[®], modelo CT3, China), para ello se elaboró una mezcla de 4.5 g de harina y 2.5 mL de agua destilada. La mezcla se amasó durante 5 min, luego se moldeó a mano en forma de cubo de aproximadamente 2 cm por lado. La textura se determinó con base en dureza (g), deformación según dureza (mm), porcentaje de la deformación según dureza (%), trabajo dureza terminado (mJ), deformación recuperable (mm), trabajo recuperable (mJ), trabajo total (mJ), fuerza adhesividad (g), adhesividad (mJ), resiliencia y longitud de la muestra (mm).

La firmeza de la masa de cada harina se determinó con un penetrómetro digital (GY-4, China) con aproximación ± 1 %, se utilizó la punta cilíndrica #2 de 7.9 mm de diámetro, con una profundidad de 10 mm de inserción del cabezal de presión.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron en R-project[®] (4.1.1) de la interface RStudio[®] (2021.09.0) ambos programas con licencia de acceso abierto, para comparar las características físicas ($n = 50$ para dimensiones y forma, $n = 10$ para fricción interna y externa y $n = 3$ para el resto de las determinaciones) de las semillas de calabaza de Castilla (*C. moschata*), vainas de frijol pinto Saltillo (*P. vulgaris*) y vainas de chícharo (*P. sativum*); con la especie como fuente de variación para cada una de las variables estudiadas. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). El valor de estas comparaciones es referencial, como parte de la caracterización física para determinar la utilidad potencial de la materia prima.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con el análisis de varianza, las dimensiones de las semillas de calabaza de Castilla, vainas de chícharo y ejote presentaron diferencia significativa ($p < 0.001$). La vaina de chícharo presentó mayor ancho y grosor respecto a la semilla de calabaza y vaina de ejote (Cuadro 1). Mientras que la vaina de ejote presentó mayor largo respecto a la vaina de chícharo y la semilla de calabaza. La vaina de ejote mostró mayor volumen (301.13 mm^3), diámetro medio aritmético, área superficial específica y diámetro geométrico respecto a la semilla de calabaza y vaina de chícharo. Mientras que la semilla de calabaza presentó mayor relación de aspecto (45 %) y esfericidad comparada con la vaina de chícharo y la vaina de ejote (Cuadro 1).

Las dimensiones de las semillas de calabaza de Castilla se encuentran dentro de los valores reportados por Delgado-Paredes *et al.* (2014) en la variedad de *C. moschata*

Cuadro 1. Dimensiones promedio y forma de semillas de calabaza de Castilla, vainas de chícharo y ejote.

Producto evaluado	Semilla de calabaza	Vaina de chícharo	Vaina de ejote
Ancho (mm)	8.33	11.71	9.28
Grosor (mm)	2.38	9.19	8.47
Largo (mm)	18.47	77.66	125.18
Diámetro geométrico (mm)	7.13	20.26	21.41
Área superficial específica (mm ²)	160.06	1291.92	1441.25
Relación de aspecto (%)	45.24	15.14	7.45
Esfericidad (%)	38.69	26.15	17.15
Diámetro medio aritmético (mm)	9.72	32.85	47.64
Volumen (mm ³)	24.39	225.79	301.13

Chuyan con promedios de 17.60 y 8.80 mm de largo y ancho, respectivamente. Así mismo, Chí-Sánchez *et al.* (2020) reportaron valores de 8.22 a 9.10 mm de ancho y 1.80 a 2.70 mm de grosor en la variedad *C. moschata* Duch. En tanto que Cáseres *et al.* (2010) encontraron valores de 7.40 mm de ancho y 11.50 mm de largo en la variedad de *C. moschata* Duch. ex Lam.

Las dimensiones de las vainas de ejote fueron similares a las vainas de frijol ejotero, con amplitud de valores de 5.54–6.90 y 111.19–130.70 mm de ancho y largo, respectivamente (Bravo-Delgado *et al.*, 2021). En tanto que, Pumalpa *et al.* (2020) reportaron valores para vainas de frijol de 115 y 12 mm de largo y ancho, respectivamente. Lépiz *et al.* (2010) obtuvieron valores de 120 y 11 mm de largo y ancho, respectivamente para frijol domesticado. También, Yalçın *et al.* (2007) reportaron valores para las vainas de chícharo similares a los de esta investigación (7.80 mm, 6.41 mm y 5.55 mm en largo, ancho y grosor).

En cambio, los valores de forma encontrados, tales como la baja relación de aspecto indica que las semillas de calabaza de Castilla, vainas de chícharo y ejote se podrán deslizar durante el transporte en superficies planas. El diámetro geométrico considera el volumen del grano o semilla y la transferencia de calor es proporcional al área superficial específica (Wilhelm *et al.*, 2004). Estas propiedades físicas de tamaño y forma dependen del contenido de humedad que afecta principalmente al diámetro geométrico.

Se encontró diferencia ($p \leq 0.001$) en la fricción interna, fricción externa y conductividad eléctrica de las harinas de semillas de calabaza, vainas de chícharo y ejote. La harina de semilla de calabaza presentó mayor fricción interna (0.98) respecto a las harinas de vainas de chícharo y ejote. Mientras que las harinas de semillas de calabaza, vainas de chícharo y ejote presentaron mayor fricción externa sobre madera. En cambio en el azulejo las harinas de semillas de calabaza y vainas de chícharo presentaron menor fricción externa. La harina de semilla de calabaza presentó mayor conductividad eléctrica tanto en agua desionizada como en agua destilada respecto a las otras dos harinas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de forma en medio sólido y líquido de semillas de calabaza de Castilla, vainas de chícharo y ejote.

Producto evaluado	μ_i (-)	Material	μ_e (-)	Medio de disolucion	Conductividad eléctrica (k Ω)
Vaina de ejote	0.81±0.01b [†]	Lámina de acero	1.12±0.04f	Agua desionizada	28.97±0.60c
		Madera entabla	1.33±0.06a		
		Tabla de plástico	1.21±0.04bcde	Agua destilada	29.15±0.86c
		Vidrio	1.23±0.06bc		
Vaina de chícharo	0.80±0.01b	Azulejo	1.21±0.04bcde	Agua desionizada	28.16±1.17c
		Lámina de acero	1.22±0.05bcd		
		Madera en tabla	1.27±0.04ab	Agua destilada	33.86±0.80b
		Tabla de plástico	1.18±0.04cdef		
Semilla de calabaza	0.98±0.05a	Vidrio	1.16±0.04def	Agua desionizada	38.42±1.71a
		Azulejo	0.99±0.04g		
		Lámina de acero	1.17±0.02cdef	Agua destilada	37.04±0.51a
		Madera en tabla	1.32±0.04a		
		Tabla de plástico	1.15±0.06ef		
		Vidrio	1.04±0.04g		
		Azulejo	1.02±0.03g		

[†]Medias con literal distinta indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$).

En los resultados de las pruebas de fricción interna, el flujo de las harinas es limitado; de acuerdo con Barbosa-Cánovas *et al.* (2005) una fricción interna cercana a 0.35 indica libre fluidez, de 0.35 – 0.45 algo cohesivo, 0.45 – 0.55 cohesivo (pérdida de libre fluidez) y para valores mayores de 0.55 el flujo es limitado. Los valores de fricción interna son diferentes a los encontrados por otros autores. Rössel-Kipping *et al.* (2018) reportaron valores de fricción interna (0.56) de las harinas de semillas de calabaza de Castilla criolla con cáscara. Mientras que Ganjloo *et al.* (2018) encontraron valores para las semillas de chícharo de 2.70 (40.62° con 75.15 % de humedad) y 1.17 (20.50° con 15.21 % de humedad). La diferencia se debe a que la fricción interna está determinada por el tamaño, forma, volumen, densidad y orientación de las partículas que conforman las harinas o semillas. La variación principal en su desempeño se debe al contenido de humedad (Mohsenin, 1986), así como a la forma y material de las tolvas de descargue, la vibración y presión de las harinas.

Los resultados de fricción externa mostraron que el azulejo y el vidrio fueron los materiales que presentaron menor fricción externa las harinas de semillas de calabaza de Castilla, vainas de chícharo y ejote, en comparación con los otros materiales. Los resultados de esta investigación fueron diferentes a los reportados por Rössel-Kipping *et al.* (2018) quienes indicaron valores de fricción externa para harina de semillas de calabaza con cáscara de 0.59 y 0.81 en vidrio y madera, respectivamente. También, Ganjloo *et al.* (2018) obtuvieron para harina de semillas de chícharo los siguientes valores de fricción: en caucho (0.388-0.413), aluminio (0.292–0.351), acero inoxidable (0.270–0.311) y lámina galvanizada (0.360–0.409). Las diferencias entre estos valores

registrados del ángulo de fricción externa se deben probablemente al contenido de humedad que genera mayor adhesión y cohesión entre las partículas de harina, también a la rugosidad de las superficies de contacto, el tamaño, la forma de partícula, la rugosidad y la textura de las partículas (Mohsenin, 1986).

En la conductividad eléctrica, la diferencia de la harina de vaina de chícharo con agua destilada está relacionada con la concentración total de sustancias ionizadas y compuestos orgánicos en el agua, así como la temperatura a la cual se realiza la medición (Valdivia-Medina *et al.*, 2010). Además, la conductividad eléctrica depende de la resistencia, la geometría usada para contener al alimento, la edad, las condiciones ambientales, el manejo del cultivo y las características de cada especie.

Los resultados del tamizado muestran que la harina de semillas de calabaza tuvo mayor porcentaje de retención en el intervalo de tamaño entre 0.180 mm y 0.300 mm, mientras que la harina de vainas de chícharo mostró mayor porcentaje de tamaño entre 0.075 mm y 0.150 mm, y la harina de vainas de ejote fue mayor en 0.300 mm (Figura 2).

La línea roja en la Figura 2 muestra el límite máximo permitido para la clasificación de harinas de trigo de acuerdo con la Norma Mexicana (NMX-F-007-1982). En función del tamizado las tres harinas reúnen las condiciones de granulometría que la norma establece, 73 % es el mínimo de retención de las fracciones de 0.297 y 0.149 mm de abertura de malla; equivalentes a # 50 y # 100 Alcón® (México). La malla # 50 usada para el análisis en este estudio es ligeramente más abierta (0.300 mm). Las harinas de nopal, semillas de calabaza, vainas de chícharo y ejote se clasifican y designan de acuerdo con la "Norma Mexicana para la harina de trigo" como harinas de Grado III y

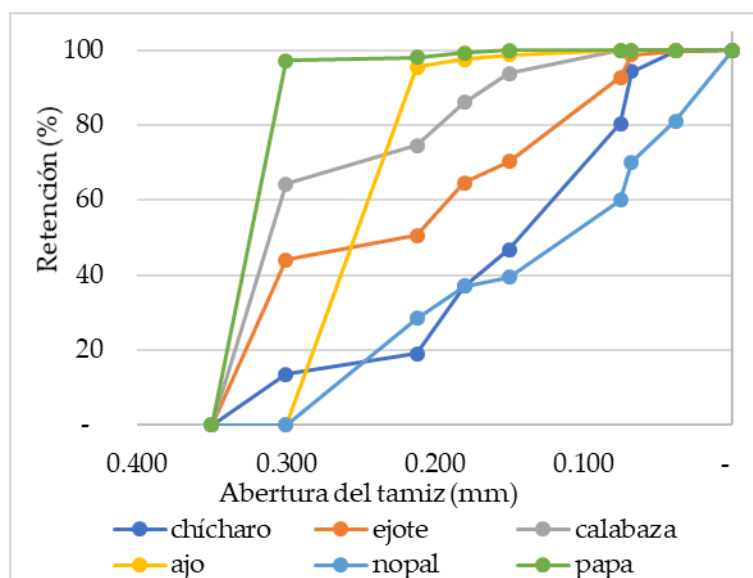


Figura 2. Comparación del tamiz de las harinas elaboradas con semillas de calabaza de Castilla (*Cucurbita moschata*), vainas de chícharo (*Pisum sativum*) y ejote (*Phaseolus vulgaris*), con harinas de ajo (*Allium sativum*), nopal (*Opuntia ficus-indica*), papa (*Solanum tuberosum*) como referencia.

II, aptas para elaboración de galletas y pastas para sopa. En estas harinas se apreció un menor porcentaje de muestra en la charola, lo cual corresponde a la fracción más fina. El índice de tamaño de partícula presentó diferencias ($p \leq 0.001$); la harina de vaina chícharo obtuvo el mayor índice (158.97), seguida de las demás harinas; harina de vaina ejote, harina de semilla calabaza, harina de ajo, harina de nopal y por último, la harina de papa. De acuerdo con Gómez *et al.* (1987) los valores altos de índice de tamaño de partícula indican una harina más fina, lo cual se relaciona con masas más cohesivas; las harinas de chícharo, nopal y ejote son harinas más finas. La granulometría de la harina determina el uso al cual se destina, por ejemplo, una harina para tostadas y tamales requiere una granulometría más gruesa que la destinada a tortillas. Los factores que inciden en el tamaño medio de partículas de la harina son la dureza del grano, la humedad, la cantidad de álcali utilizada, el tiempo de reposo, el ajuste en la velocidad de los molinos y el cribado de la harina. En la actualidad existe muy poca información del proceso de tamizado de harinas de semillas de calabaza, vainas de chícharo y ejote. De acuerdo con las observaciones microscópicas, las harinas en los tamaños de partícula de 0.030, 0.038, 0.058, 0.075 y 0.300 mm no presentaron diferencias ($p > 0.05$). Mientras que en los tamaños 0.150, 0.180 y 0.212 mm, las partículas de las harinas presentaron diferencias ($p \leq 0.05$) entre las harinas debido a que las dimensiones dependen de la orientación de las partículas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Dimensiones de harinas de semillas de calabaza de Castilla, vainas de chícharo y ejote.

Producto evaluado	Tamaño de partícula (mm)	Área (mm ²)	Perímetro (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)
Harina de vaina de ejote	0.030	0.004±0.001a [†]	0.258±0.046a	0.085±0.014a	0.034±0.002b
	0.038	0.003±0.002b	0.256±0.055b	0.092±0.003b	0.066±0.011c
	0.058	0.010±0.002c	0.418±0.032c	0.157±0.020c	0.097±0.011d
	0.075	0.022±0.004d	0.636±0.087d	0.251±0.041d	0.130±0.007e
	0.150	0.066±0.009ef	1.010±0.056f	0.307±0.017f	0.256±0.020f
	0.180	0.161±0.041g	1.695±0.230h	0.666±0.149h	0.331±0.016g
	0.300	0.192±0.047i	1.954±0.098j	0.529±0.025i	0.424±0.090i
Harina de vaina de chícharo	0.212	0.165±0.025j	1.720±0.109l	0.590±0.026k	0.359±0.027j
	0.030	0.005±0.002a	0.311±0.029a	0.118±0.016a	0.090±0.010a
	0.038	0.004±0.001b	0.252±0.036b	0.087±0.003b	0.064±0.017c
	0.058	0.013±0.004c	0.454±0.056c	0.157±0.029c	0.111±0.022d
	0.075	0.027±0.007d	0.662±0.092d	0.211±0.031d	0.131±0.022e
	0.150	0.091±0.029e	1.320±0.148e	0.523±0.037e	0.253±0.025f
Harina de semilla de calabaza	0.180	0.137±0.080gh	1.582±0.610hi	0.572±0.327h	0.303±0.017g
	0.300	0.177±0.031i	1.852±0.282j	0.759±0.179i	0.318±0.009i
	0.212	0.260±0.064j	2.021±0.144k	0.720±0.034j	0.497±0.067j
	0.075	0.017±0.006d	0.518±0.072d	0.180±0.016d	0.118±0.035e
	0.150	0.026±0.006f	0.664±0.093g	0.203±0.005g	0.160±0.029f
	0.180	0.027±0.004h	0.732±0.074i	0.259±0.015h	0.136±0.020h
	0.300	0.154±0.028i	1.652±0.128j	0.533±0.033i	0.385±0.008i

[†]Medias con literal distinta indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$); n = 3.

En el análisis del perfil de textura para las masas hechas con harina de semillas de calabaza, vainas de chícharo y vainas de ejote, la dureza de las masas de vaina de ejote fue mayor que la de las masas de semilla de calabaza y trigo ($p \leq 0.05$). El porcentaje de deformación según dureza y la longitud de la muestra no presentaron diferencias ($p > 0.05$) entre las masas (Cuadro 4).

Los resultados de las propiedades reológicas, mecánicas, plásticas y viscoelásticas de la masa de semillas de calabaza son iguales a los de la masa de trigo, excepto la resiliencia que tuvo diferencias significativas ($p < 0.05$). Mientras que la masa de chícharo no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) con la masa de trigo en las siguientes ocho propiedades: dureza, deformación según dureza, porcentaje de deformación según dureza, deformación recuperable, trabajo recuperable, fuerza de adhesividad, adhesividad y longitud de la muestra. El valor de firmeza alcanzado por la masa generada con vainas de ejote ($10.09 \text{ N} \pm 0.52$) fue el más alto comparado con el resto de las masas hechas con vaina de chícharo y semilla de calabaza.

Esta diferencia de firmeza se debe probablemente al contenido de humedad, a la textura, estructura y forma de las partículas de la masa. Además, el endospermo se hidrata y plastifica cuando entra en contacto con el agua, lo cual causa que el esfuerzo (energía) durante la compresión se absorba y ocasione una deformación más pronunciada

Cuadro 4. Textura de masas elaboradas con harinas de semillas de calabaza de Castilla, vainas de chícharo y ejote.

Producto /Propiedad	Vaina de ejote	Vaina de chícharo	Semilla de calabaza	Harina de trigo
Dureza (g)	1397.90±549.40a [†]	854.80±390.68ab	374.38±73.38b	144.17±8.96b
Deformación según dureza (mm)	9.16±1.16ab	7.13±2.29b	9.98±0.04a	9.94±0.04ab
Deformación según dureza (%)	48.82±7.53a	41.14±17.16a	55.65±5.70a	57.73±1.72a
Trabajo dureza terminado (mJ)	87.73±31.18a	55.00±22.26 ab	22.10±4.39abc	6.89±0.39c
Deformación Recuperable (mm)	0.79±0.31a	0.73±0.14a	0.45±0.07a	0.89±0.13a
Trabajo recuperable (mJ)	4.03±1.08a	1.70±1.45b	0.52±0.10b	0.42±0.04b
Trabajo total (mJ)	91.76±32.25a	56.69±23.23ab	22.62±4.32bc	7.31±0.37c
Fuerza adhesividad (g)	77.00±72.48ab	18.70±5.31b	101.88±24.91a	19.83±5.75ab
Adhesividad (mJ)	2.61±1.37a	1.13±0.91a	1.50±1.26a	0.37±0.08a
Resiliencia	0.04±0.01ab	0.03±0.02b	0.03±0.01b	0.06±0.01a
Longitud de la muestra (mm)	18.83±0.61a	18.01±2.36a	18.06±1.76a	17.21±0.44a
Firmeza (N)	10.09±0.52a	3.09±0.23b	1.50±0.23c	NA

[†] Medias con literal distinta indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$). NA: no se determinó.

del biomaterial; por ello las propiedades reológicas de las masas son críticas en la manufactura de alimentos (Barak *et al.*, 2013). Las masas exhiben un comportamiento viscoelástico y plástico por efecto combinado de las propiedades reológicas, plásticas, friccionales y de estructura de un fluido viscoso y un sólido elástico; todas ellas ocasionadas por la combinación de harinas y agua (Upadhyay *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES

Las características físicas de harinas de las semillas de calabaza, vainas de chícharo y ejote mostraron que las cáscaras no afectaron sus propiedades reológicas, plásticas y viscoelásticas. La granulometría de las harinas cumple con lo establecido en la NMX-F-007-1982 para su uso en la elaboración de galletas y pastas para sopa, entre otros. Esta información estimula el aprovechamiento de residuos orgánicos sin amenazar la sustentabilidad de los sistemas alimentarios. Dentro del paradigma actual 4.0, conocer las propiedades físicas de las semillas puede promover su inclusión en paquetes tecnológicos para regiones con poco desarrollo e innovación. Esto podría mejorar la respuesta de México a la demanda mundial de alimentos y biomateriales con mayores y mejores niveles de producción que otorguen un valor agregado a los subproductos agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) por la beca otorgada a Selena del Rocío Martínez-Betancourt. A la Coordinación Académica Región Altiplano Oeste (CARAO) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por el acceso a sus instalaciones para desarrollar parte de los análisis de laboratorio.

REFERENCIAS

- Barak S, Mudgil D, Khatkar BS. 2013. Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties. *LWT-Food Science and Technology* 51 (1): 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.011>
- Barbosa-Cánovas GV, Ortega-Rivas E, Juliano P, Yan H. 2005. Physical properties, processing and functionality: Particle Properties. *In: Food Powders. Food Engineering Series*. Springer: Boston, MA, USA, pp: 19–54. https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0_2
- Bravo-Delgado HR, Ortega M ML, Loeza-Corte JM, Díaz-López E. 2021. Comportamiento ecofisiológico de tres cultivares de ejote *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae) bajo un clima de transición templado a seco. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 24: 1–7. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.331>
- Cáseres E, Piña K, Berrío T, Leal N. 2010. Comparación morfológica de frutos y semillas de ayama (*Cucurbita moschata* Duch. ex Lam). *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 28: 32–36.
- Chí-Sánchez FA, Alvarado-López CJ, Cristóbal-Alejo J, Reyes-Ramírez A. 2020. Características morfológicas y determinación de minerales por μ -XRF en fruto de calabaza (*Cucurbita moschata* Duch). *Agrociencia* 54 (5): 683–690. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i5.2125>
- Delgado-Paredes GE, Rojas-Idrogo C, Sencie-Tarazona A, Vásquez-Núñez L. 2014. Caracterización de frutos y semillas de algunas cucurbitáceas en el norte del Perú. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37 (1): 7–20.
- Diamond, J. 2006. Colapso: por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen. Editorial Arte S.A. Caracas, Venezuela. 747 p.
- Dutta SK, Nema VK, Bharddwaj RK. 1988. Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research* 39: 259–268. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(88\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0021-8634(88)90147-3)

- Erbes A, Gutman G, Lavarello P, Robert V. 2019. Industria 4.0: oportunidades y desafíos para el desarrollo productivo de la provincia de Santa Fe. *In: Documentos de Proyectos (LC/TS.2019/80)*. Girándola S, Abeles M, Ciciliani A (coords.); Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Chile. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/44954/S1901011_es.pdf (Recuperado: junio 2022).
- Galan P, Babio N, Salas-Salvadó J. 2019. Nutri-Score: el logotipo frontal de información nutricional útil para la salud pública de España que se apoya sobre bases científicas. *Nutrición Hospitalaria* 36 (5): 1213–1222.
- Ganjloo A, Bimakr M, Zarringhalami S, Jalili-Safaryan M, Ghorbani M. 2018. Moisture-dependent physical properties of green peas (*Pisum sativum* L.). *International Food Research Journal* 25 (3): 1246–1252.
- Goldstein I. 2007. Reseña “Colapso: por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen (de Jared Diamond)”. *Revista Geográfica Venezolana* 48 (2): 311–318.
- Gómez MH, Rooney LW, Waniska RD, Pflugfelder RL. 1988 Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. *Cereal Foods World* 32 (5): 372–377.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2020. Población rural y urbana. http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema_P (Recuperado: marzo 2022).
- Jain RK, Bal S. 1997. Properties of Pearl millet. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66 (2): 85–91. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0119>
- Lépiz I R, López AJ, Sánchez G JJ, Santacruz-Ruvalcaba JJ, Nuño R R, Rodríguez GE. 2010. Características morfológicas de formas cultivadas, silvestres e intermedias de frijol común de hábito trepador. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 33 (1): 21–28.
- Maduako JN, Faborode MO. 1994. Characterization of the breaking behaviour of cocoa pods. *Journal of Agricultural Engineering and Resources* 59 (2): 89–96.
- McCabe WL, Smith JC, Harriott P. 1993. Properties, handling, and mixing of particulate solids. *In: Unit Operations of Chemical Engineering*. 5th Edition. McGraw-Hill Chemical Engineering Series International Editions: New York, NY, USA. pp: 927–959.
- Mohsenin NN. 1986. Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics, and mechanical properties. Gordon and Breach Science Publishers. 2nd Edition. New York, NY, USA. 891 p.
- NMX-F-007-1982 (NORMA MEXICANA NMX-F-007-1982). 1982. Harina de trigo. http://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-F-007-1982_harina_de_trigo.pdf. (Recuperado: mayo 2021).
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2021. Población mundial. <https://www.unfpa.org/es/data/world-population-dashboard> (Recuperado: mayo 2022).
- Pumalpa M D, Cantaro S H, Estrada C R, Huaranga J A. 2020. Caracterización fenotípica y agronómica de líneas avanzadas de frijol voluble (*Phaseolus vulgaris*) resistentes a virus en Perú. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales (RIIAR)*. 7 (1): 7–20.
- Rössel-Kipping D, Ortiz-Laurel H, Amante-Orozco A, Durán-García HM, López-Martínez LA. 2018. Características físicas y químicas de la semilla de calabaza para mecanización y procesamiento. *Nova Scientia* 10 (21): 61–77. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1467>
- Upadhyay SK, Singh JS, Saxena AK, Singh DP. 2012. Impact of PGPR inoculation on growth and antioxidant status of wheat under saline conditions. *Plant Biology* 14 (4): 605–611. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00533.x>
- Valdivia-Medina RY, Pedro-Valdés S, Laurel-Gómez M. 2010. Agua para uso en laboratorios. Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología. Ciudad de La Habana, Cuba. *Boletín Científico Técnico INIMET* 1: 3–10.
- Wilhelm WW, Johnson JMF, Hatfield JL, Voorhees WB, Linden DR. 2004. Crop and soil productivity response to corn residue removal: A literature review. *Agronomy Journal* 96 (1): 1–17. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1000a>
- Yalçın I, Özarslan C, Akbaş T. 2007. Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. *Journal of Food Engineering* 79 (2): 731–735. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.039>

***Peniocereus serpentinus* AND *Austrocylindropuntia subulata*, NEW HOSTS OF THE CACTUS WEEVIL (*Metamasius spinolae* Gyllenhal) IN THE STATE OF MEXICO**

Jesús Ricardo **Sánchez-Pale**¹, Andrés **Quezada-Salinas**^{2*}, Magnolia **Moreno-Velázquez**²,
María Margarita **Oliva-Hurtado**²

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México. C. P. 50200.

² Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria. Carretera Federal México-Pachuca km 37.5, Tecámac, Estado de México, México. C. P. 55740.

* Author for correspondence: andresqsa79@gmail.com

ABSTRACT

The cactus weevil (*Metamasius spinolae*) is a pest of *Opuntia ficus-indica*. It can develop not only in *Opuntia* species but also in other cacti and members of the Asparagaceae family. In 2017, damage and presence of adult insects with characteristics similar to the cactus weevil were reported in two species of cacti, *Austrocylindropuntia subulata* and *Peniocereus serpentinus*. The objective was to identify the insect and determine if the two cacti species are hosts, field and laboratory research was conducted from 2017 to 2019 in the municipality of Axapusco, State of Mexico. Stems with larval damage were selected at four study sites, which remained in field conditions until the emergence of adult insects. The behaviour of *M. spinolae* on the host plant, mating sites, incubation period and damage development over time were recorded. *M. spinolae* was identified and determined to fulfill its life cycle on *A. subulata* and *P. serpentinus*. Larvae cause the most damage by feeding on the internal part (pith) of the stems, which causes tissue rotting and death of the affected part. The adult feeds on tender buds and mature stems, causing deformation and weakening of the plant. The two cacti species proved to be host plants that can harbour populations of *M. spinolae* and, therefore, have a high potential to act as reservoirs of the pest, which can then migrate to prickly-pear cactus crop. This report expands the knowledge of hosts of the cactus weevil. The information obtained shall be useful for vegetable growers to apply phytosanitary measures in alternate hosts, combat reservoirs and avoid re-infestations of the pest.

Keywords: life cycle, pest, damage, insect, cacti.

INTRODUCTION

The cactus weevil (*Metamasius spinolae* Gyllenhal; Coleoptera: Curculionidae) is an economically important pest and limiting factor in the commercial production of the prickly-pear cactus (*Opuntia ficus-indica* [L.] Miller), intended for vegetable and fruit consumption (Rodríguez *et al.*, 2012; Cobarrubias, 2017). This crop represents a means

Citation: Sánchez-Pale JR, Quezada-Salinas A, Moreno-Velázquez M, Oliva-Hurtado MM. 2022. *Peniocereus serpentinus* and *Austrocylindropuntia subulata*, new hosts of the cactus weevil (*Metamasius spinolae* Gyllenhal) in the State of Mexico. *Agrociencia*. 56(7): 1354-1371. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2759>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: May 14, 2022.
Approved: September 30, 2022.
Published in Agrociencia:
November 16, 2022.

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



of economic sustenance for families and communities, mainly in the High Valleys of Mexico (Méndez, 1994). There are records of damage caused by the cactus weevil on other species of the Cactaceae family: *Opuntia cantabrigiensis* (Cárdenas-Ramos and Mandujano, 2021); *Cylindropuntia imbricata*, *Pereskiaopsis diguetii* (Ruiz-Moreno, 2018); *Selenicereus hamatus* (López-Martínez *et al.*, 2016a); *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* (Bravo-Avilez *et al.*, 2014); *Hylocereus undatus*, *H. undatus* subsp. *luteocarpus*, *H. purpusii*, *H. ocamponis* (Ramírez *et al.*, 2011); *Cereus* sp. (Vaurie, 1967); *Cereus giganteus* and *Ferocactus* sp. (Anderson, 1948); and from the family Asparagaceae: *Agave* spp. (Romo and Morrone, 2012). Similarly, this pest represents a serious threat to pitaya (*Stenocereus queretaroensis*) production in central Mexico, whose ecological, cultural and economic importance is relevant in the region (Bravo-Avilez *et al.*, 2014). In 2017, insect damage and presence of adults with similar characteristics to the cactus weevil were reported in two species of cacti, *Peniocereus serpentinus* and *Austrocylindropuntia subulata*. There are no reports in the scientific literature of insects causing similar damage to that observed. Additionally, larvae were found inside the stems and adults feeding on the external tissues. These cacti have an ecological and ornamental importance, and in some cases also medicinal. However, there is greater concern about their role as a host and reservoir for *M. spinolae*. In view of this problem, this study was conducted with the objective to identify the insect species and determine if the two cacti are hosts.

MATERIALS AND METHODS

Location of the study area

The research was carried out in the municipality of Axapusco (19° 43' 10" N, 98° 47' 50" W, altitude 2350 m), State of Mexico, Mexico. Field and laboratory work was conducted from 2017 to 2019, at sites where *P. serpentinus* and *A. subulata* were present. Local residents reported the damage.

Field work

Four study sites were selected based on the presence of affected plants in Santa María Actipac, San Felipe Zacatepec, Santo Domingo Aztacameca and Axapusco. At each site, the percentage of affected stems was determined, and the internal and external damages were described. From each site, 50 cm long stem segments with larvae were selected. They were labelled and wrapped in mesh to retain the insects during their emergence. Observations were made every two weeks to determine the emergence and adult activity periods. The behaviour of *M. spinolae* on the host plant, mating sites, incubation period and damage development over time were recorded. All insects that emerged were collected and preserved in 96 % alcohol.

Morphological identification

Adults were identified up to species following the keys and morphological characteristics described by Vaurie (1967), Romo and Morrone (2012), and compared

with reference insects. The weevils were studied with a Quasar Qm25 microscope at 30-90 X magnification. Images were processed using CombineZP 1.0 software (alanhadley.software.informer.com).

RESULTS AND DISCUSSION

Characterization of sampling sites

The greatest number of sites with the presence of *M. spinolae* was in the locality of Santa María Actipac, followed by San Felipe Zacatepec. In both localities, damage caused by *M. spinolae* was identified in both cacti *A. subulata* and *P. serpentinus*, the former being the species most affected by the weevil. Regarding the percentage of affected stems, *A. subulata* was the species with the most damage, with a range of 10 to 20 %. Damaged *P. serpentinus* were only found in three locations, with 10 to 18 % of the stems affected.

Damage description

Stems of *A. subulata* and *P. serpentinus* affected by *M. spinolae* larvae showed black coloration and dark brown to black secretion of viscous consistency and unpleasant odour (Figure 1A). Inside, galleries in the pith (Figure 2B) and rotten collenchyma (Figure 2C) were observed. In all cases, *M. spinolae* larvae were observed feeding on the pith in both hosts (Figure 2D). Only one larva per affected stem was found.

As a result of adult feeding, destruction of the epidermis and part of the collenchyma was observed, leaving the internal tissue exposed (Figure 2). Damage was detected most frequently during the months of September to November and was caused mainly by the larvae, due to the feeding process. Adults were identified as *Metamasius spinolae*



Figure 1. External and internal damage caused by the larva of *Metamasius spinolae*. A: stem of *Austrocyllindropuntia subulata* with black coloration and dark brown to black secretion of viscous consistency; B: *Peniocereus serpentinus* stem with galleries in the pith; C: rotten collenchyma; D: larva feeding on the pith.



Figure 2. External damage caused by feeding of adult *Metamasius spinolae*. A and B: destruction of the epidermis and part of the collenchyma in stems of *Peniocereus serpentinus* and *Austrocylindropuntia subulata*; C and D: scars caused by adult feeding.

based on their key characteristics: black specimens, with four orange-red spots on the elytra, two on the front part of the prothorax and two more on the notopleural angle; the characteristics of the antenna, rostrum, pronotum, scutellum, elytra, legs and pygidium (Figure 3) corresponded to those reported by Vaurie (1967), and Romo and Morrone (2012).

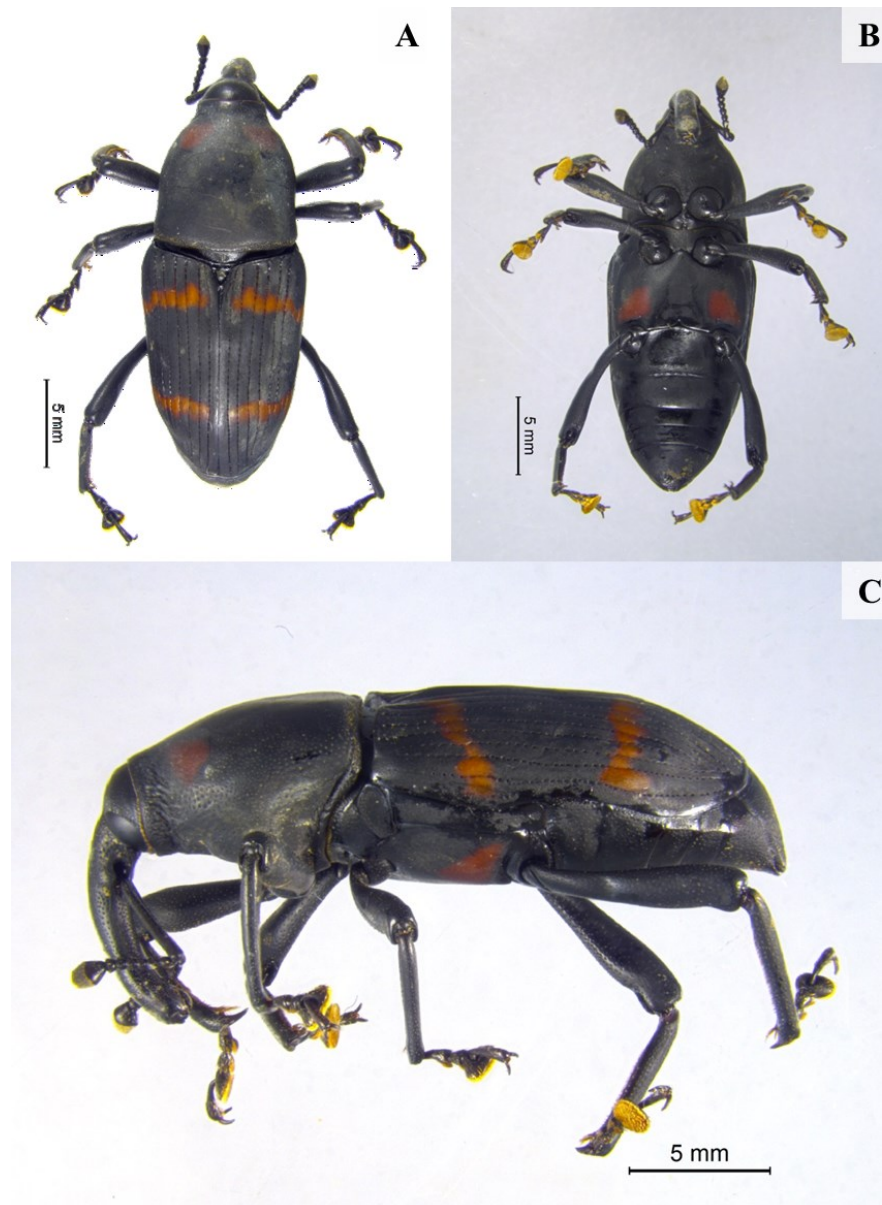


Figure 3. Adult *Metamasius spinolae*. A: dorsal view; B: ventral view; C: side view.

Development of *Metamasius spinolae* on *Austrocylindropuntia subulata* and *Peniocereus serpentinus*

Under field conditions, adults of *M. spinolae* (n = 50) emerged through a hole in the pupal chamber (cocoon) starting in April and continuing until June. Oviposition began in May, was more frequent between July and August, and ended until October. Females (n = 20) deposited eggs in cracks or crevices of healed wounds on stems and covered them with a dark brown viscous secretion that hardens and is similar to the colour of damaged host tissue, making it difficult to locate oviposition sites (Figure 4A).

The incubation period was 15 days. The larva was introduced into the stem up to the pith, on which it fed throughout its development, making secondary galleries to expel the excreta. In response, both species of cacti secreted a mucilaginous substance, resulting in dark brown to black viscous runoff with an unpleasant odour. The time to complete larval development is an average of 150 d, from July to December. Mature larvae constructed an elliptical chamber (pupal cell or cocoon) in the medulla of both hosts with host fibres (Figure 4B), where they remained as pupae for an average of four months, from December to April. However, it was observed that pupal development can begin in March and end in July.

Non-cultured species can maintain pest insect populations, becoming reservoirs for future crop infestations. Identification of naturally grown alternate host plants can be critical to prevent the development of polyphagous pests in a 'main' or 'focal' agricultural species (Saeed *et al.*, 2014), and play an important role in pest management. Alternate host plants can also be beneficial to agriculture when they harbour populations of natural enemies (Naveed *et al.*, 2007). This study identified two new hosts of *M. spinolae*, *Austrocylindropuntia subulata* and *Peniocereus serpentinus*, which are mainly used as ornamental plants. In other cases, they have been found near commercial *Opuntia ficus-indica* fields, without being exposed to insecticides or other phytosanitary measures to control the cactus weevil, which could act as reservoirs of *M. spinolae* and be an important source of transfer for *Opuntia ficus-indica*.

Regarding the life cycle, the behaviour of *M. spinolae* on *A. subulata* and *P. serpentinus* coincides with previous reports on other host species, mainly for *Opuntia ficus-indica* (Muñiz-Vélez, 1998; Baddi and Flores, 2001; López-Martínez *et al.*, 2016b; Cobarrubias, 2017). In these two new hosts, an annual generation occurred; the male and female fed on young stems, and the females used the stems for oviposition. The eggs were covered with a dark brown secretion of viscous consistency, secreted by the ovipositor, an observation that differs from that reported by Cobarrubias (2017), who mentioned that the female seals the oviposition area with a mixture of food and regurgitated saliva.

With the report of *A. subulata* and *P. serpentinus*, the number of hosts for *M. spinolae* expands, which coincides with that reported by Bravo-Avilez *et al.* (2014) and López-Martínez *et al.* (2016a), who stated that the distribution of *M. spinolae* and the number of host plants is increasing. Ruiz-Moreno (2018) observed that the loss of spaces



Figure 4. *Metamasius spinolae*. A: the female lays eggs in cracks or crevices of healed wounds and coats them with a dark brown, viscous secretion (arrow); B: The mature larva builds an elliptical chamber (pupal cell or cocoon) in the medulla with host fibres.

occupied by primary hosts, mainly due to urbanization, may be the cause for *M. spinolae* is searching new hosts. Likewise, López-Martínez *et al.* (2016a) mentioned that due to the cultivation of new cactus species and the continuous transportation of

wild species, the distribution of this weevil species and the number of its host plants would be expected to increase.

In this research, the inhabitants of the region mentioned an increase in the cultivated area of *O. ficus-indica* in areas previously used for growing corn, beans and barley, as a result of the decrease in precipitation and increase in temperature, a consequence of climate change. Producers opted for the prickly-pear cactus crop because it is more adaptable to the new conditions. We consider that the increase in the cultivated area of this cactus and the intensive management of insect pests such as the weevil have forced this pest species to look for new hosts, which indicates that *M. spinolae* has a great plasticity that allows it to complete its life cycle in other species of cacti such as *A. subulata* and *P. serpentinus*.

CONCLUSIONS

This study has shown that *A. subulata* and *P. serpentinus* are host plants that can harbour populations of *M. spinolae*. Therefore, they have a high potential to act as reservoirs of the pest that can migrate to *O. ficus-indica* crops. Management strategies should be applied not only to the cactus crop but also to *A. subulata* and *P. serpentinus*, mainly those close to the cultivation area, without eliminating their populations, since these wild species have ecological, ornamental and, in some cases, medicinal importance.

REFERENCES

- Anderson WH. 1948. Larvae of some genera of Calendrinae (=Rhynchophorinae) and Stromboscerinae (Coleoptera: Curculionidae). *Annals of the Entomological Society of America* 41: 413–437. <https://doi.org/10.1093/aesa/41.4.413>
- Baddi MH, Flores AE. 2001. Prickly pear cacti pests and their control in Mexico. *Florida Entomologist* 84: 503–505. <https://doi.org/10.2307/3496379>
- Bravo-Avilez D, Rendón-Aguilar B, Zavala-Hurtado JA, Fornoni J. 2014. Primer registro de *Cactophagus spinolae* (Coleoptera: Curculionidae) sobre dos especies de *Stenocereus* (Cactaceae) en el centro de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 972–974. <https://doi.org/10.7550/rmb.43764>
- Cárdenas-Ramos D, Mandujano CM. 2021. Cactus weevil (*Metamasius spinolae* Gyllenhal) florivore and frugivore of *Opuntia catabrigiensis* Lynch (Cactaceae). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 20: e2021201. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2021.20.1>
- Cobarrubias JM. 2017. Insect pest of cactus pear. In: *Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear*. Inglese F, Saenz C, Mondragon C, Nefzaoui A, Louhaichi M. (eds.); FAO: Rome, Italy. pp: 125–132.
- López-Martínez V, Pérez-De La O NB, Ramírez-Bustos II, Alia-Tejagal I, Jiménez-García D. 2016a. Current and potential distribution of the cactus weevil, *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae), in Mexico. *The Coleopterists Bulletin* 70: 327–334. <https://doi.org/10.1649/0010-065X-70.2.327>
- López-Martínez V, Escudero F, Jones RW. 2016b. New ornamental host record for the cactus weevil, *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) in Morelos, Mexico. *The Coleopterists Bulletin* 70: 274–275. <https://doi.org/10.1649/0010-065X-70.2.274>
- Méndez GS de J. 1994. Principales plagas del nopal. In: *Aportaciones Técnicas y Experiencias de la Producción de Tuna en Zacatecas*. Esparza G, Méndez S de J. (eds.); CECCAM: Morelos, Zacatecas, México. pp: 49–57.
- Muñiz-Vélez R. 1998. *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal, 1838), Picudo del Nopal (Coleoptera: Curculionidae: Rhynchophoridae). *Duguesiana* 5: 42–43.
- Naveed M, Salam A, Saleem MA. 2007. Contribution of cultivated crops, vegetables, weeds and

- ornamental plants in harboring of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) and associated parasitoids (Hymenoptera: Aphelinidae) in cotton agroecosystem in Pakistan. *Journal of Pest Science* 80: 191–197. <https://doi.org/10.1007/s10340-007-0171-z>
- Ramírez DJJ, Rodríguez-Leyva E, Livera-Muñoz M, Pedroza-Sandoval A, Bautista-Martínez N, Nava-Díaz C. 2011. First report of *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) on three species of *Hylocereus* (Cactaceae) in Morelos, Mexico. *Acta Zoológica Mexicana* 27: 863–866.
- Rodríguez LE, Lomelí JR, Romero J, Valdez JM. 2012. *Bothrideres cactophagi* Schwarzs (Coleoptera: Bothrideridae), parasitoide del picudo del nopal en México. *Acta Zoológica Mexicana* 28: 218–221.
- Romo A, Morrone J. 2012. Especies mexicanas de Curculionidae (Insecta: Coleoptera) asociadas con agaves (Asparagaceae: Agavoideae). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 83: 1025–1035. <https://doi.org/10.7550/rmb.30633>
- Ruiz-Moreno JJ. 2018. First record of *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) on two Cactaceae species in Jalisco, Mexico. *Acta Zoológica Mexicana (Nueva Serie)* 34: 1–4. <https://doi.org/10.21829/azm.2018.3412157>
- Saeed R, Razaq M, Hardy ICW. 2014. The importance of alternative host plants as reservoirs of the cotton leaf hopper, *Amrasca devastans*, and its natural enemies. *Journal of Pest Science* 88: 517–531. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0638-7>
- Vaurie P. 1967. A revision of the Neotropical genus *Metamasius* (Coleoptera: Curculionidae: Rhynchophorinae). *Bulletin of the American Museum of Natural History* 136: 177–268.

Peniocereus serpentinus Y *Austrocylindropuntia subulata*, NUEVOS HOSPEDANTES DEL PICUDO DEL NOPAL (*Metamasius spinolae* Gyllenhal) EN EL ESTADO DE MÉXICO

Jesús Ricardo Sánchez-Pale¹, Andrés Quezada-Salinas^{2*}, Magnolia Moreno-Velázquez²,
María Margarita Oliva-Hurtado²

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México. C. P. 50200.

² Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria. Carretera Federal México-Pachuca km 37.5, Tecámac, Estado de México, México. C. P. 55740.

* Autor para correspondencia: andresqsa79@gmail.com

RESUMEN

El picudo del nopal (*Metamasius spinolae*) es una especie plaga de *Opuntia ficus-indica*. Puede desarrollarse no solo en especies de *Opuntia* sino también en otras cactáceas y en miembros de la familia Asparagaceae. En 2017, se reportaron daños y presencia de insectos adultos con características similares al picudo del nopal en dos especies de cactáceas, *Austrocylindropuntia subulata* y *Peniocereus serpentinus*. Con el objetivo de identificar al insecto y determinar si las dos especies de cactáceas son hospedantes, de 2017 a 2019 se realizó una investigación de campo y de laboratorio en el municipio de Axapusco, Estado de México. En cuatro sitios de estudio se seleccionaron tallos con daños por larvas, los cuales permanecieron en condiciones de campo hasta la emergencia de los insectos adultos. Se registró el comportamiento de *M. spinolae* en la planta hospedante, los sitios de apareamiento, el período de incubación y el desarrollo de daños a través del tiempo. Se identificó y determinó que *M. spinolae* cumple su ciclo de vida en *A. subulata* y *P. serpentinus*. Las larvas ocasionan el mayor daño al alimentarse de la parte interna (médula) de los tallos, lo que causa pudrición de tejidos y muerte de la parte afectada. El adulto se alimenta de brotes tiernos y tallos maduros, ocasionando deformaciones y debilitamiento de la planta. Se demostró que las dos especies de cactáceas son plantas hospedantes que pueden albergar poblaciones de *M. spinolae* y, por lo tanto, tienen un alto potencial para actuar como reservorios de la plaga, que luego puede migrar a los cultivos de nopal. Con este reporte se amplía el conocimiento de hospedantes del picudo del nopal. La información obtenida será de utilidad para los productores de esta hortaliza para aplicar medidas fitosanitarias en hospedantes alternos, combatir reservorios y evitar reinfestaciones de la plaga.

Palabras clave: ciclo de vida, plaga, daños, insecto, cactáceas.

Citation: Sánchez-Pale JR, Quezada-Salinas A, Moreno-Velázquez M, Oliva-Hurtado MM. 2022. *Peniocereus serpentinus* y *Austrocylindropuntia subulata*, nuevos hospedantes del picudo del nopal (*Metamasius spinolae* Gyllenhal) en el Estado de México. *Agrociencia*. 56(7): 1354-1371. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2759>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: May 14, 2022.
Approved: September 30, 2022.
Published in Agrociencia:
November 16, 2022.

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



INTRODUCCIÓN

El picudo del nopal (*Metamasius spinolae* Gyllenhal; Coleoptera: Curculionidae) es una plaga de importancia económica y factor limitante en la producción comercial de

nopal (*Opuntia ficus-indica* [L.] Miller), destinada para el consumo de verdura y tuna (Rodríguez *et al.*, 2012; Cobarrubias, 2017). Este cultivo representa un medio de sustento económico para familias y comunidades principalmente de los Valles Altos de México (Méndez, 1994). Existen registros de daños causados por el picudo del nopal en otras especies de la familia Cactaceae: *Opuntia cantabrigiensis* (Cárdenas-Ramos y Mandujano, 2021); *Cylindropuntia imbricata*, *Pereskiaopsis diguetii* (Ruiz-Moreno, 2018); *Selenicereus hamatus* (López-Martínez *et al.*, 2016a); *Stenocereus pruinosus* y *Stenocereus stellatus* (Bravo-Avilez *et al.*, 2014); *Hylocereus undatus*, *H. undatus* subsp. *luteocarpus*, *H. purpusii*, *H. ocamponis* (Ramírez *et al.*, 2011); *Cereus* sp. (Vaurie, 1967); *Cereus giganteus* y *Ferocactus* sp. (Anderson, 1948); y de la familia Asparagaceae: *Agave* spp. (Romo y Morrone, 2012). De igual manera, esta plaga representa una seria amenaza para la producción de pitaya (*Stenocereus queretaroensis*) del centro de México, cuya importancia ecológica, cultural y económica es relevante en la región (Bravo-Avilez *et al.*, 2014). En 2017 se reportaron daños y presencia de insectos adultos con características similares al picudo del nopal en dos especies de cactáceas, *Peniocereus serpentinus* y *Austrocylindropuntia subulata*. No hay informes en la literatura científica de insectos que causen daños similares a los observados. Además, se encontraron larvas al interior de los tallos y adultos alimentándose de los tejidos externos. Estas cactáceas son de importancia ecológica, ornamental y en algunos casos medicinal. Sin embargo, existe una mayor preocupación por el papel que pudieran desempeñar como hospedante y reservorio de *M. spinolae*. Ante este problema, se realizó este estudio con el objetivo de identificar al insecto y determinar si las dos especies de cactáceas son hospedantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

Los trabajos se realizaron en el municipio de Axapusco (19° 43' 10" N, 98° 47' 50" O, altitud 2350 m), Estado de México, México. El trabajo de campo y laboratorio se realizó de 2017 a 2019, en sitios con presencia de *P. serpentinus* y *A. subulata*. Habitantes de la región reportaron los daños.

Trabajo de campo

Se seleccionaron cuatro sitios de estudio con base en la presencia de plantas afectadas en Santa María Actipac, San Felipe Zacatepec, Santo Domingo Aztacameca y Axapusco. En cada localidad se determinó el porcentaje de tallos afectados y se describió el daño observado en la parte interna y externa. De cada sitio, se seleccionaron segmentos de tallo de 50 cm de longitud con presencia de larvas. Se etiquetaron y envolvieron en una malla para retener a los insectos durante su emergencia. Se realizaron observaciones cada dos semanas con el fin de determinar el período de emergencia y actividad del adulto. Se registró el comportamiento de *M. spinolae* en la planta hospedante, los sitios de apareamiento, el período de incubación y el desarrollo de daños a través del tiempo. Todos los insectos que emergieron fueron recolectados y preservados en alcohol al 96 %.

Identificación morfológica

Los adultos fueron identificados a nivel de especie con el uso de claves y características morfológicas descritas por Vaurie (1967), Romo y Morrone (2012), y se compararon con insectos de referencia. Los picudos se estudiaron con un microscopio Quasar Qm25 a un aumento de 30-90 X. Las imágenes fueron procesadas con el paquete CombineZP 1.0 (alan-hadley.software.informer.com).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los sitios de muestreo

El mayor número de sitios con presencia de *M. spinolae* se presentó en la localidad de Santa María Actipac, seguida de San Felipe Zacatepec. En ambas se identificaron daños causados por *M. spinolae* tanto en *A. subulata* como en *P. Serpentinus*; la primera fue la especie con mayor afectación por picudo. Respecto al porcentaje de tallos afectados, fue *A. subulata* la especie con más daños, con un intervalo del 10 al 20 %. Individuos dañados de *P. serpentinus* se encontraron solo en tres localidades, con 10 a 18 % de los tallos afectados.

Descripción de daños

Los tallos de *A. subulata* y *P. serpentinus* afectados por larvas de *M. spinolae* presentaron coloración negra y secreción de color café oscuro a negro de consistencia viscosa y olor desagradable (Figura 1A). En el interior, se observaron galerías en la médula (Figura 2B) y pudrición del colénquima (Figura 2C). En todos los casos se observaron larvas de *M. spinolae* alimentándose de la médula en ambos hospedantes (Figura 2D). Únicamente se encontró una larva por tallo afectado.



Figura 1. Daños externos e internos causados por la larva de *Metamasius spinolae*. A: tallo de *Austrocyllindropuntia subulata* con coloración negra y secreción color café oscuro a negro de consistencia viscosa; B: tallo de *Peniocereus serpentinus* con galerías en la médula; C: pudrición del colénquima; D: larva alimentándose de la médula.



Figura 2. Daños externos causados por la alimentación del adulto de *Metamasius spinolae*. A y B: destrucción de la epidermis y parte del colénquima en tallos de *Peniocereus serpentinus* y *Austrocylindropuntia subulata*; C y D: cicatrices causadas por la alimentación de adultos.

Como resultado de la alimentación del adulto, se observó destrucción de la epidermis y parte del colénquima que dejó el tejido interno expuesto (Figura 2). El daño se detectó con mayor frecuencia durante los meses de septiembre a noviembre y fue causado principalmente por la larva, debido al proceso de alimentación. Los adultos fueron identificados como *Metamasius spinolae* con base en sus características clave: especímenes de color negro, con cuatro manchas rojo anaranjadas en los élitros, dos sobre la parte anterior del protórax y dos más en el ángulo notopleural; las características de la antena, rostro, pronoto, escutelo, élitros, patas y pigidio (Figura 3) correspondieron a lo reportado por Vaurie (1967), y Romo y Morrone (2012).

Desarrollo de *Metamasius spinolae* en *Austrocylindropuntia subulata* y *Peniocereus serpentinus*

En condiciones de campo, los adultos de *M. spinolae* (n = 50) emergieron a través de un orificio en la cámara pupal (cocón) a partir del mes de abril y continuaron hasta junio. La oviposición comenzó en mayo, fue más frecuente entre julio y agosto, y se extendió hasta el mes de octubre. Las hembras (n = 20) depositaron los huevos en las grietas o hendiduras de heridas cicatrizadas presentes en los tallos y los cubrieron con una secreción viscosa de color marrón oscuro que se endurece y es similar al color del tejido dañado del hospedante, lo cual dificulta la localización de los sitios de oviposición (Figura 4A).

El período de incubación fue de 15 días. La larva se introdujo en el tallo hasta la médula, de la cual se alimentó durante todo su desarrollo y realizó galerías secundarias para expulsar la excreta. En respuesta, ambas especies de cactáceas secretaron una sustancia mucilaginosa que originó escurrimientos viscosos de color café oscuro a negro y de olor desagradable. El tiempo para completar el desarrollo larvario es un promedio de 150 d, entre julio y diciembre. Las larvas maduras construyeron en la médula de ambos hospedantes una cámara elíptica (celda pupal o cocón) con fibras del hospedante (Figura 4B), donde permanecieron como pupas durante un promedio de cuatro meses, de diciembre a abril. Sin embargo, se observó que el desarrollo de la pupa puede iniciar en el mes de marzo y culminar en el mes de julio.

Las especies no cultivadas pueden mantener poblaciones de insectos plaga y representar un reservorio para futuras infestaciones de cultivos. La identificación de plantas hospedantes alternas que crecen naturalmente puede ser fundamental para prevenir el desarrollo de plagas polífagas en una especie agrícola ‘principal’ o ‘focal’ (Saeed *et al.*, 2014), y jugar un papel importante en el manejo de plagas. Las plantas hospedantes alternas también pueden ser beneficiosas para la agricultura cuando albergan poblaciones de enemigos naturales (Naveed *et al.*, 2007). En este estudio se identificaron dos nuevos hospedantes de *M. spinolae*, *Austrocylindropuntia subulata* y *Peniocereus serpentinus* que se utilizan principalmente como plantas ornamentales. En otros casos, se han encontrado cerca de campos comerciales de tuna y nopal, sin estar expuestos a insecticidas u otras medidas fitosanitarias para controlar el picudo del nopal, pudiendo

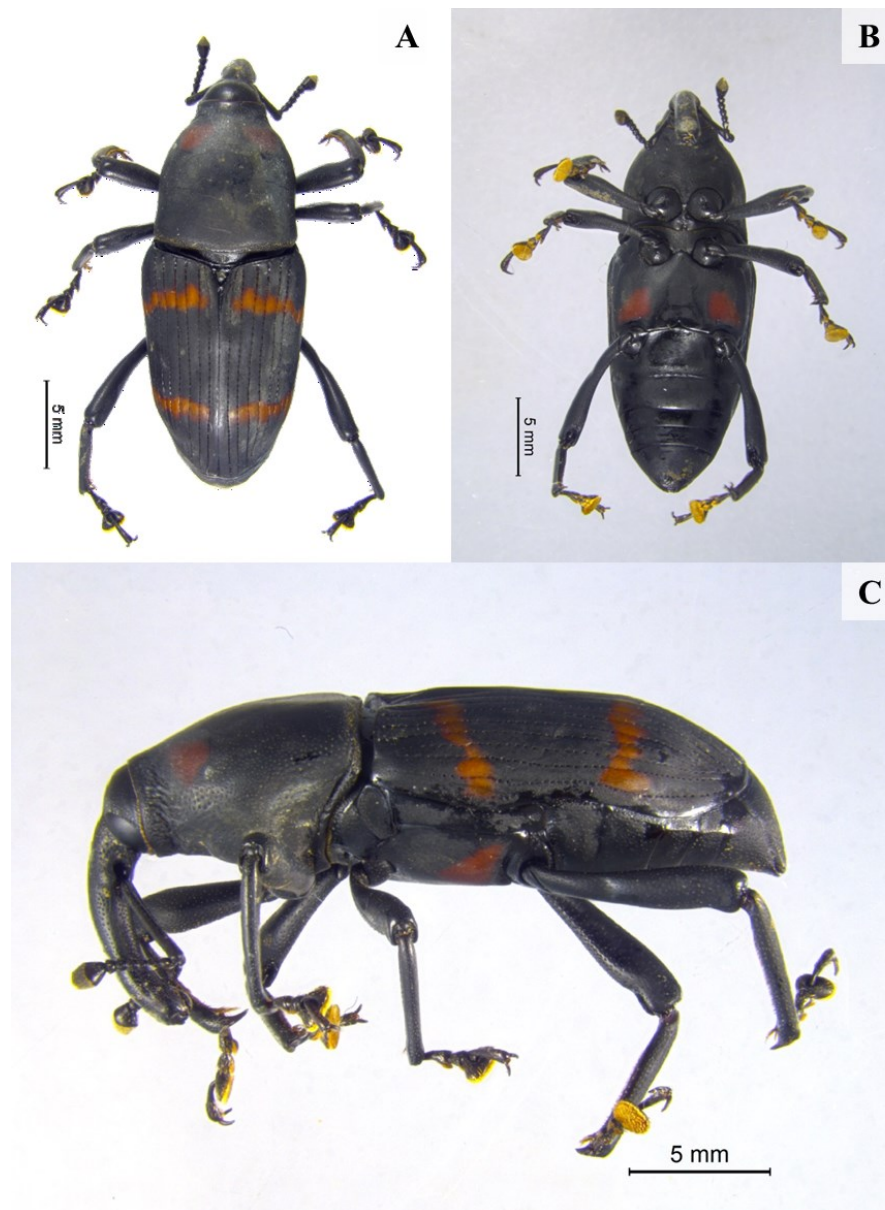


Figura 3. Adulto de *Metamasius spinolae*. A: vista dorsal; B: vista ventral; C: vista lateral.

actuar como reservorios de *M. spinolae* y ser una importante fuente de transferencia para *Opuntia ficus-indica*.

En cuanto al ciclo de vida, el comportamiento de *M. spinolae* en *A. subulata* y *P. serpentinus* coincide con reportes previos en otras especies hospedantes, principalmente para *Opuntia ficus-indica* (Muñiz-Vélez, 1998; Baddi y Flores, 2001; López-Martínez *et al.*, 2016b; Cobarrubias, 2017). En estos dos nuevos hospedantes se presentó una ge-



Figura 4. *Metamasius spinolae*. A: la hembra deposita sus huevos en grietas o hendiduras de heridas cicatrizadas y los cubre con una secreción de color marrón oscuro, de consistencia viscosa (flecha); B: la larva madura construye en la médula una cámara elíptica (célula pupal o cocón) con fibras del hospedante.

neración anual, el macho y la hembra se alimentaron de tallos jóvenes, y las hembras utilizaron los tallos para ovipositar. Los huevos fueron cubiertos con una secreción de color marrón oscuro de consistencia viscosa, secretada por el ovipositor, observación

que difiere de lo reportado por Cobarrubias (2017), quien mencionó que la hembra sella la zona de oviposición con una mezcla de comida y saliva regurgitada.

Con el reporte de *A. subulata* y *P. serpentinus* se amplía el número de hospedantes para *M. spinolae*, lo cual coincide con lo reportado por Bravo-Avilez *et al.* (2014) y López-Martínez *et al.* (2016a), quienes señalaron que la distribución de *M. spinolae* y el número de plantas hospedantes va en aumento. Ruiz-Moreno (2018) observó que la pérdida de los espacios que ocupaban los hospedantes primarios, debido principalmente a la urbanización, puede ser la causa de que *M. spinolae* esté en búsqueda de nuevos hospedantes. Asimismo, López-Martínez *et al.* (2016a) mencionaron que debido al cultivo de nuevas especies de cactáceas y al transporte continuo de especies silvestres, se podría esperar que la distribución de esta especie de picudo y el número de sus plantas hospedantes aumente.

En esta investigación, los habitantes de la región mencionaron un aumento en la superficie cultivada de *O. ficus-indica* en áreas previamente destinadas para el cultivo de maíz, frijol y cebada, como resultado de la disminución en la precipitación y aumento en la temperatura, consecuencia del cambio climático. Los productores optaron por el cultivo del nopal ya que presenta una mayor adaptabilidad a las nuevas condiciones. Consideramos que el aumento en la superficie cultivada de nopal y el manejo intensivo de insectos plaga como el picudo, han obligado a esta especie plaga a buscar nuevos hospedantes, lo que refiere que *M. spinolae* posee una gran plasticidad que le permite completar su ciclo de vida en otras especies de cactáceas como *A. subulata* y *P. serpentinus*.

CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado que *A. subulata* y *P. serpentinus* son plantas hospedantes que pueden albergar poblaciones de *M. spinolae* y, por lo tanto, tienen un alto potencial para actuar como reservorios de la plaga que puede migrar a los cultivos de *O. ficus-indica*. Las estrategias de manejo se deben aplicar no solo en el cultivo de nopal sino también en *A. subulata* y *P. serpentinus*, principalmente aquellas cercanas al área de cultivo, sin eliminar sus poblaciones ya que estas especies no cultivadas tienen importancia ecológica, ornamental, y en algunos casos, medicinal.

REFERENCIAS

- Anderson WH. 1948. Larvae of some genera of Calendrinae (=Rhynchophorinae) and Stromboscerinae (Coleoptera: Curculionidae). *Annals of the Entomological Society of America* 41: 413–437. <https://doi.org/10.1093/aesa/41.4.413>
- Baddi MH, Flores AE. 2001. Prickly pear cacti pests and their control in Mexico. *Florida Entomologist* 84: 503–505. <https://doi.org/10.2307/3496379>
- Bravo-Avilez D, Rendón-Aguilar B, Zavala-Hurtado JA, Fornoni J. 2014. Primer registro de *Cactophagus spinolae* (Coleoptera: Curculionidae) sobre dos especies de *Stenocereus* (Cactaceae) en el centro de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 972–974. <https://doi.org/10.7550/rmb.43764>
- Cárdenas-Ramos D, Mandujano CM. 2021. Cactus weevil (*Metamasius spinolae* Gyllenhal) florivore and frugivore of *Opuntia catabrigiensis* Lynch (Cactaceae). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 20: e2021201. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2021.20.1>

- Cobarrubias JM. 2017. Insect pest of cactus pear. *In: Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear*. Inglese F, Saenz C, Mondragon C, Nefzaoui A, Louhaichi M. (eds.); FAO: Rome, Italy. pp: 125–132.
- López-Martínez V, Pérez-De La O NB, Ramírez-Bustos II, Alia-Tejacal I, Jiménez-García D. 2016a. Current and potential distribution of the cactus weevil, *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae), in Mexico. *The Coleopterists Bulletin* 70: 327–334. <https://doi.org/10.1649/0010-065X-70.2.327>
- López-Martínez V, Escudero F, Jones RW. 2016b. New ornamental host record for the cactus weevil, *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) in Morelos, Mexico. *The Coleopterists Bulletin* 70: 274–275. <https://doi.org/10.1649/0010-065X-70.2.274>
- Méndez GS de J. 1994. Principales plagas del nopal. *In: Aportaciones Técnicas y Experiencias de la Producción de Tuna en Zacatecas*. Esparza G, Méndez S de J. (eds.); CECCAM: Morelos, Zacatecas, México. pp: 49–57.
- Muñiz-Vélez R. 1998. *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal, 1838), Picudo del Nopal (Coleoptera: Curculionoidea: Rhynchophoridae). *Duguesiana* 5: 42–43.
- Naveed M, Salam A, Saleem MA. 2007. Contribution of cultivated crops, vegetables, weeds and ornamental plants in harboring of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) and associated parasitoids (Hymenoptera: Aphelinidae) in cotton agroecosystem in Pakistan. *Journal of Pest Science* 80: 191–197. <https://doi.org/10.1007/s10340-007-0171-z>
- Ramírez DJJ, Rodríguez-Leyva E, Livera-Muñoz M, Pedroza-Sandoval A, Bautista-Martínez N, Nava-Díaz C. 2011. First report of *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) on three species of *Hylocereus* (Cactaceae) in Morelos, Mexico. *Acta Zoológica Mexicana* 27: 863–866.
- Rodríguez LE, Lomelí JR, Romero J, Valdez JM. 2012. *Bothrideres cactophagi* Schwarz (Coleoptera: Bothrideridae), parasitoide del picudo del nopal en México. *Acta Zoológica Mexicana* 28: 218–221.
- Romo A, Morrone J. 2012. Especies mexicanas de Curculionidae (Insecta: Coleoptera) asociadas con agaves (Asparagaceae: Agavoideae). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 83: 1025–1035. <https://doi.org/10.7550/rmb.30633>
- Ruiz-Moreno JJ. 2018. First record of *Cactophagus spinolae* (Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) on two Cactaceae species in Jalisco, Mexico. *Acta Zoológica Mexicana (Nueva Serie)* 34: 1–4. <https://doi.org/10.21829/azm.2018.3412157>
- Saeed R, Razaq M, Hardy ICW. 2014. The importance of alternative host plants as reservoirs of the cotton leaf hopper, *Amrasca devastans*, and its natural enemies. *Journal of Pest Science* 88: 517–531. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0638-7>
- Vaurie P. 1967. A revision of the Neotropical genus *Metamasius* (Coleoptera: Curculionidae: Rhynchophorinae). *Bulletin of the American Museum of Natural History* 136: 177–268.

WATER USE AND SUPPLY IN THE NORTHERN REGION OF BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Fidel **Bautista-Mayorga**¹, José Alberto **García-Salazar**^{1*}, José Saturnino **Mora-Flores**¹,
Silvia Xochilt **Almeraya-Quintero**¹, Mercedes **Borja-Bravo**²

¹ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Programa de Socioeconomía, Estadística e Informática-Economía. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Pabellón. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, Aguascalientes, México. C. P. 20671.

* Author for correspondence: jsalazar@colpos.mx

ABSTRACT

The demographic and economic growth in the northern region of the Mexican state of Baja California has led to increased water use and competition for this resource among diverse consumer sectors. The regional dynamism has made it increasingly difficult to meet the demand for water provision. The aim of this investigation was to allocate the water withdrawn from the Mexicali Valley and San Luis Río Colorado (SLRC) aquifers in a scenario of water scarcity among the various consumer sectors by municipality of the states of Baja California and Sonora, as well as to determine the price that would allow for a reduction in the amount of water taken from the aquifers. A spatial equilibrium model was formulated and validated, considering fixed supply and functions of demand. The 2019 results show that the total demand for water from municipalities in residential, commercial, industrial, agricultural and livestock sectors were 197.2, 21.7, 16.7, 758 and 5.7 hm³, with Tijuana standing out in the first three sectors, whereas Mexicali and SLRC were highlighted in the farming sector. Regarding the water price, the Tijuana, Tecate, and Ensenada municipalities pay a high tariff for its use, whereas Mexicali and SLRC pay the lowest tariffs. A 10 % reduction in water availability would be achieved if the price in the agricultural sector in Mexicali and SLRC increased by 20 and 22 %, respectively, over the base price. As the price rises, the demand in this sector for both municipalities would decrease by 2.6 %.

Keywords: residence, commerce, industry, agriculture, livestock, spatial equilibrium model.

INTRODUCTION

Worldwide, the average annual availability of water is estimated in 1386 trillion hm³, 97.5 % of which is saltwater (1351 trillion hm³) and 2.5 % is freshwater (35 trillion hm³). Approximately 70 % (24.4 trillion hm³) of the freshwater is not usable for drinking by people, since it is found in glaciers, snow and ice; 30 % (10.5 trillion hm³) is underground water and 0.4 % (0.14 trillion hm³) is found in lakes, rivers and wetlands. According

Citation: Bautista-Mayorga F, García-Salazar JA, Mora-Flores JS, Almeraya-Quintero SX, Borja-Bravo M. 2022. Water use and supply in the northern region of Baja California, Mexico. *Agrociencia*. 56(7): 1372-1403. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2547>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: September 29, 2021.
Approved: August 30, 2022.
Published in Agrociencia:
November 11, 2022.

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



to the National Water Commission (CONAGUA), one of the factors limiting human access to 0.77 % of the world's freshwater is the distance between water sources and population centers. Mexico gets a yearly average of 1.4 million hm^3 in the form of rainfall, out of which 72.1 % goes to evapotranspiration, 21.4 % runs off by rivers and 6.4 % reloads the aquifers by infiltration. Taking into account water imports and exports to nearby countries, Mexico has an annual positive surplus of 451 585 hm^3 of renewable water. (CONAGUA, 2018).

The overexploitation of underground water has several negative effects, including a significant and continuous decline of the phreatic level which directly reduces the flow volume, the increase in operation costs and the drilling of new wells, the emergence of cracks and sinkholes in the ground caused by gaps generated in upper strata, and increased competition and disputes between water users (Mayta and Durán, 2015).

Water-consuming sectors (farming, industrial, commercial and residential) contribute to the water overexploitation problem since its expansion exerts pressure on natural resources (water, soil, subsoil). The depletion of drinkable water and other natural resources would be catastrophic for humanity, which is why it is essential to create plans and monitor water usage efficiency (Palacios-Vélez and Escobar-Villagrán, 2016). The Baja California Peninsula ranks fourth out of 13 water administration regions in the country with the most overexploited aquifers, only behind the Lerma Santiago Pacífico, Cuenca Central del Norte and Río Grande regions. In 2011, 13 overexploited aquifers and 10 with seawater intrusion were reported. As of 2019, there were 18 overexploited aquifers and 11 with seawater intrusion. In this hydrological region, the municipalities of Mexicali (Baja California) and San Luis Río Colorado (SLRC, in Sonora) are known for consuming large amounts of water, particularly in the agricultural sector which belongs to irrigation istrict 014 (CONAGUA, 2019). In 2019, out of the 602 hm^3 of the overexploited Valle de Mexicali aquifer, the agricultural sector at Mexicali consumed 588 hm^3 of water. From the 263.5 hm^3 of the Valle de SLRC aquifer, which is close to overexploitation, the agricultural sector in SLRC consumed 170 hm^3 (CONAGUA, 2020).

Tijuana is notable for its demographic, commercial and industrial dynamism. In 2019, Baja California had an estimated population of 3.6 million people, out of which 49 % (1.8 million people) were concentrated in Tijuana and 30 % in Mexicali. According to information provided by the National Population Council (CONAPO), population in Tijuana is projected to grow 19.5 % between 2019 and 2030 (CONAPO, 2018). The National Statistics and Geography Institute (INEGI) showed the dynamism in the commercial and industrial sectors in Tijuana, since 97.2 % of the Economically Active Population (EAP) were working in the second quarter of 2019. Among them, 59.4 % were working in the tertiary sector (which includes businesses, restaurants and housing services, among others), while 34.3 % were employed in the secondary sector (extractive, electric and manufacturing industries, among others). 6.2 % of workers did not specify the economic activity they were working in (INEGI, 2021a).

The Baja California State Water Commission (CEABC) stated that Tijuana (including Playas de Rosarito), Tecate and a part of Ensenada are granted concessions from the

aquifers mentioned above in order to meet their water needs. The water is transported by the Río Colorado-Tijuana Aqueduct (ARCT) until it reaches the Carrizo and Las Auras dams (CEABC, 2018). As already indicated, the expansion of the population and the economy implies a higher demand of water and an increase in the overexploitation of aquifers. In the light of this situation, possible solutions come into view. On the one hand, increasing the water supply to satisfy the growing demand for water. On the other, administrating and decreasing demand to reduce the pressure on the regional water resources.

Palacios-Vélez and Escobar-Villagrán (2016) proposed the following measures to prevent overexploitation of the aquifers: updating the census of pumping wells, estimating the water volume that is illegally extracted, implementing studies on the components of the hydrological balance, promoting the formation of an expert committee on underground water management, promoting a payment culture for water services in both cities and irrigation areas, a reduction in subsidies to irrigation water and urban water supply services, among others.

Studies have determined that the price of water (fees) can be used as a mechanism to reduce demand and make a more efficient use of water in different consumer sectors (Gómez-Ugalde *et al.*, 2012; Torres-Sombra *et al.*, 2013; Cota-Verdugo *et al.*, 2013; Romano *et al.*, 2016). Other studies have focused on assigning water spatially and inter-temporarily among consumer sectors in the light of a situation of scarcity and competition for the resource (Miranda-Trejo *et al.*, 2015; Castro *et al.*, 2017).

Some industries may need to reduce their consumption as a result of a decrease in water supply, and their costs will rise. Although water is necessary for all consumer sectors, this reduction would be observed in sectors in which water has the lowest use value. In economics terms, the highest water value shall be observed in sectors with the most inelastic demand, such as residential sector, in which the final consumer is a living being and there is no possibility of reducing consumption per capita. Water demand in the residential sector will be more inelastic in low-income neighborhoods, where the use of water is minimal, ensuring that demand remains high despite a significant price increase. A similar situation shall be observed in livestock production, where the final consumer is also a moving living being.

The lowest value will be observed in sectors in which demand is less inelastic, such as the agricultural sector, in which it is technically possible to reduce water use with more efficient irrigation methods. In this sector, an increase in the price of water may lead the farmer to make a more efficient use of water resources. The increase in price may also motivate the adoption of technified irrigation systems that help save water for every surface unit. The productivity of irrigation agriculture may even increase. The cost of the water may give the producer information about the value and scarcity of the resource and may prompt farmers to change their farming methods. Plants are living beings that can effectively be conducted to efficient water use. A similar situation occurs in the industrial sector, where a rise in price may encourage business owners to implement water recycling systems, resulting in significant water savings and decreased consumption.

The reallocation of water shall seek to increase the Net Social Payoff (NSP). Spatial optimization techniques at basin scales to evaluate the benefits and relative costs of water allocation are usually applied on a region. Maximizing the net social value obtained from the use of water in all sectors under the adequate restrictions would result in optimum water use levels for all sectors, along with economic benefits of water use and opportunity costs of water allocation throughout and within the productive sectors in the region (Ghosh *et al.*, 2017).

The aims of this study were to assign the water extracted from the Mexicali Valley and SLRC aquifers within a water scarcity scenario, among the different consuming sectors per municipality of the states of Baja California and Sonora, Mexico, as well as to determine the price that would make it possible to reduce the amount of water taken from the aquifers. The hypothesis established that within a scarcity scenario, the use of water would be reduced in those sectors with a lower value of use.

MATERIALS AND METHODS

The quadratic programming model maximizes the NSP, which equals to the sum of the areas below the demand curve minus the cost of underground water extraction, the value of the amount of water available in the dam for deriving and distribution costs.

If we assume r water-consuming regions of residential sector ($r = 1... R = 5$), c water-consuming regions of the commercial sector ($c = 1... C = 4$), i water-consuming regions of the industrial sector ($i = 1... I = 4$), f water-consuming regions of the agricultural sector ($f = 1... F = 2$), g water-consuming regions of the livestock farming sector ($g = 1... G = 2$), s underground water sources ($s = 1... S = 2$) and p dams ($p = 1... P = 2$), the proposed model is the following:

$$\begin{aligned}
 MAXN \ SP = & \sum_{r=1}^R [\lambda_r y_r + \frac{1}{2} w_r y_r^2] + \sum_{c=1}^C [\lambda_c y_c + \frac{1}{2} w_c y_c^2] + \sum_{i=1}^I [\lambda_i y_i + \frac{1}{2} w_i y_i^2] \\
 & + \sum_{f=1}^F [\lambda_f y_f + \frac{1}{2} w_f y_f^2] + \sum_{g=1}^G [\lambda_g y_g + \frac{1}{2} w_g y_g^2] + \sum_{p=1}^P [PAP y_p] \\
 & - \sum_{s=1}^S [PAS X_s] - \sum_{p=1}^P [PAP X_p] - \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R [D_{sr} X_{sr}] - \sum_{s=1}^S \sum_{c=1}^C [D_{sc} X_{sc}] - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I [D_{si} X_{si}] \\
 & - \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R [D_{pr} X_{pr}] - \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C [D_{pc} X_{pc}] - \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I [D_{pi} X_{pi}]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Subject to:

$$X_s \geq \sum_{r=1}^R X_{sr} + \sum_{c=1}^C X_{sc} + \sum_{i=1}^I X_{si} + \sum_{f=1}^F X_{sf} + \sum_{g=1}^G X_{sg} + \sum_{p=1}^P X_{sp} \tag{2}$$

$$X_p \geq \sum_{r=1}^R X_{pr} + \sum_{c=1}^C X_{pc} + \sum_{i=1}^I X_{pi} \tag{3}$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sr} + \sum_{p=1}^P X_{pr} \geq y_r \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sc} + \sum_{p=1}^P X_{pc} \geq y_c \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^S X_{si} + \sum_{p=1}^P X_{pi} \geq y_i \quad (6)$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sf} \geq y_f \quad (7)$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sg} \geq y_g \quad (8)$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sp} \geq y_p \quad (9)$$

$$y_r, y_c, y_i, \dots, X_{sr}, X_{sc}, X_{si}, \dots, X_{sg}, X_{sf}, X_{sp} \geq 0 \quad (10)$$

where $\lambda_r, \lambda_c, \lambda_i, \lambda_f, \lambda_g$ are the intercepts of the reverse functions of the demand in the regions r, c, i, f, g ; y_r, y_c, y_i, y_f, y_g are the amounts of water consumed in sectors r, c, i, f, g ; $\omega_r, \omega_c, \omega_i, \omega_f, \omega_g$ are the slopes of the reverse functions of the demand for water in the regions r, c, i, f, g ; y_p is the total amount of water available in dam p ; PAS is the cost of extracting underground water in the region s ; PAP is the price of water at the exit of the dam p ; X_s is the amount of water extracted in the region s ; X_p is the amount of water available in the dam p for deriving; $D_{sr}, D_{sc}, D_{si}, D_{sf}, D_{sg}, D_{sp}$ are the costs of distributing the water from s to r, c, i, f, g, p ; D_{pr}, D_{pc}, D_{pi} are the costs of distributing the water from p to r, c, p ; $X_{sr}, X_{sc}, X_{si}, X_{sf}, X_{sg}, X_{sp}$ are the amounts of underground water sent from s to r, c, i, f, g, p ; X_{pr}, X_{pc}, X_{pi} are the amounts of water sent from p to r, c, i .

The target function (Equation 1) is subjected to restrictions of water supply budget and water demand (Equations 2 to 9). The condition of non-negativity of the variables is represented in Equation 10.

The solution of the model was obtained using demand functions for each sector of water consumers: residential, commercial, industrial, agricultural and livestock farming. With the price elasticity of the demand, the fees and the amounts in demand, a total of 17 demand functions were estimated for the five municipalities (Tijuana, Tecate, Ensenada, Mexicali and SLRC) and the five consumer sectors (residential, commercial, industrial, agricultural and livestock farming) (Kawaguchi *et al.*, 1997). The elasticities were estimated via multiple linear regression for the municipality of Tijuana, as representative for Baja California. Water consumption per capita was considered the endogenous variable; whereas the water and energy prices, income, rainfall and temperature were considered exogenous variables. The data of the variables used in the regression covered the period 2006-2019. The estimated elasticity coefficients were -0.23 for the residential sector, -0.04 for the commercial sector, -0.07 for the industrial sector and from Torres-Sombra y García-Salazar (2015) were obtained elasticities of -0.125 for the agricultural sector and -0.065 for the livestock farming sector.

Water use for residential, commercial and industrial sectors for the municipality of Tijuana were taken from the CEABC (2021). For the municipalities of Tecate, Ensenada, Mexicali and SLRC, residential use was estimated as follows: number of households times the average consumption per capita of water; this information came from the CEABC (2017) and INEGI (2021b). The use of commercial and industrial water for Tecate, SLRC and Mexicali was obtained as a result of multiplying the number of shops and industries (in Tecate and SLRC), as well as the number of taps of commercial and industrial use (in Mexicali) times the average consumption per capita of commercial and industrial water, respectively; the information was taken from CEABC (2017) and INEGI (2021c).

Agricultural water consumption in the municipalities of Mexicali and SLRC came from CONAGUA (2020). In 2019, water consumption for livestock farming in the municipalities of Mexicali and SLRC was obtained by multiplying the number of livestock heads per species by the average consumption of water per capita per species; this information was taken from the Food and Agriculture Organization (FAO, 2013) and from the Agrifood Information System for Consultation-Agricultural and Fisheries Information System (SIACON-SIAP, 2020). It is important to highlight that in the municipalities of Tijuana, Tecate and a part of Ensenada, water consumption for the farming sector was not taken into consideration because the amounts of water that reach these municipalities from the dams (El Carrizo and Las Auras), which in turn obtain water from underground sources (the aquifers Valle de Mexicali and SLRC), are used exclusively for residential, commercial and industrial sectors.

For the sectors directly supplied from underground sources (Mexicali and SLRC), the distribution costs were calculated with a differences in prices (the fee paid by the end users minus the extraction costs); this difference represents all the costs involved in water supply. Similarly, for the sectors that are supplied with the water available in the dams (Tijuana, Tecate and a part of Ensenada), the difference in prices was calculated with the fees paid by the end consumer and the costs of water derived from the dam (including the costs of extracting water, electricity, maintenance and operation to be able to transport the water from the points of extraction to the dams); the information was taken from the CEABC (2018) and CONAGUA (2021).

The data on the electricity fees were obtained from INEGI (2021d), the income (general minimum wage) was obtained from the National Minimum Wage Commission (CONASAMI, 2021), the Gross Domestic Product (GDP) of the secondary activities of the state of Baja California was obtained from INEGI (2021e) and the national average rainfall and temperature were provided by the National Weather Service (SMN, 2021).

RESULTS AND DISCUSSION

The validation of the model of both water use and price in the municipalities of Baja California and Sonora (SLRC), as well as for the different water-using residential, commercial, industrial and livestock farming sectors (R, C, I, F, G) are shown in Table 1. The base model either overestimates or underestimates the observed values, as

Table 1. Water model validation for the municipalities of Baja California and Sonora, 2019.

Municipality	R ^r	C ^c	I ^s	F ^a	G ^l	R ^r	C ^c	I ^s	F ^a	G ^l
	Millions of m ³					MXN \$ m ⁻³				
	Use observed					Price observed				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.86	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	588.0	5.7	7.15	51.16	59.82	0.19	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.0	0.0	8.28	6.68	9.70	0.19	0.19
Total	197.2	21.7	16.7	758.0	5.7					
	Base model use					Base model price				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.84	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	584.6	5.7	7.15	51.16	59.82	0.20	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.8	0.0	8.28	6.68	9.71	0.18	0.19
Total	197.3	21.7	16.7	755.4	5.7					
	Difference to the observed									
Tijuana	0	0	0			0	0	0		
Tecate	0	0	0			0	-0.02	0		
Ensenada	0					0				
Mexicali	0	0	0	-3.4	0	0	0	0	0.01	0
SLRC	0	0	0	0.8	0	0	0	0.01	-0.01	0
Total	0	0	0	-2.6	0					
	Difference to the observed (%)									
Tijuana	0.0	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0		
Tecate	0.0	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0		
Ensenada	0.0					0.0				
Mexicali	0.0	0.0	0.0	-0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	0.1
SLRC	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	-3.7	-0.1
Total	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0					

R^r: residential sector; C^c: commercial sector; I^s: industrial sector; F^a: agricultural sector; G^l: livestock sector. MXN \$: Mexican pesos.

indicated by the positive and negative signs in the percentage differences. Even yet, the difference is minimal, which allows to predict some scenarios.

In 2019, the total water use in the residential sector was 197.2 hm³, out of which Tijuana and Mexicali used 98.5 and 63.4 hm³. The total use in the commercial sector was 21.7 hm³, out of which Tijuana and Mexicali demanded 15.4 and 4.2 hm³, respectively. Likewise, the total use in the industrial sector was 16.7 hm³, out of which Tijuana and Mexicali demanded 10 and 4.7 hm³, respectively. The agricultural sector demanded a total of 758 hm³ of water, of which Mexicali is by far the greatest consumer with 588 hm³ of water, and the remainder is used by SLRC. Additionally, the total use of water

in the livestock sector was slightly higher than 5.7 hm³, out of which Mexicali used the majority, and the remainder was used by SLRC (Table 1).

Regarding water prices, the municipalities of Tijuana, Tecate and a part of Ensenada were found to pay the highest prices in the residential, commercial and industrial sectors in the state of Baja California. For example, the prices paid by Tijuana in these sectors were 19.5, 80.0 and 83.8 MXN \$ m⁻³, respectively, whereas Mexicali and SLRC paid the lowest prices for water; Mexicali pays 7.2, 51.2 and 59.8 MXN \$ m⁻³ for residential, commercial and industrial use, while SLRC pays 8.3, 6.7, 9.7 MXN \$ m⁻³ for the same sectors. It is evident that SLRC, belonging to the state of Sonora, pays the least for the use of water (Table 1).

Low costs for water consumption encourage waste and imply greater water use from overexploited aquifers, which increases the danger of a short-, middle-, and long-term water crises. To avoid this situation, it is important to pay a price for water, since this would allow for a more efficient water use, and exert less pressure on overexploited aquifers. The high prices found specifically in the municipalities of Baja California are widely related with two issues. The first is the distance between water sources and consumption areas, where the price of water is more expensive due to transportation and infrastructure maintenance costs. The second is a high reliance on external water sources to supply internal demand as local water supplies are scarce.

The effects on the use and water price when reducing water availability by 10 % in the aquifers Valle de Mexicali and SLRC were calculated (Cuadro 2). The use by all the sectors of all municipalities, including the water available in the dams is equal to the water extracted from both aquifers (losses by piping or evaporation were not considered); thus, the base model estimated an extraction rate of 996.8 hm³. As water supply contracts as indicated, it would become 897.2 hm³. This measure would result in a decrease in the demand for water and an increase in the price of water.

In this scenario, the use of water in residential, commercial and industrial sectors of all municipalities did not undergo significant changes. On the contrary, regarding the use in the agricultural sector notorious changes did occur. In Mexicali, water use fell from 584.6 to 569.2 hm³ (2.6 % compared to the base model), and in SLRC it dropped from 170.8 to 166.3 hm³ (2.6 % in regard to the base model). The livestock farming sector of Mexicali and SLRC experienced a reduction in the use, considering the base model of 1.4 %, respectively (Table 2).

The effects obtained are a consequence of the magnitude of price elasticity of demand observed in every consumer sector. Although demand is inelastic across all sectors, there are variations in the size of their coefficient of elasticity.

The findings of this study supported those of Ghosh *et al.* (2017), who claimed that in face of a reduction in water supply, the farming sector would be the most impacted, in contrast to the other water consumer sectors such as residential, commercial or industrial, since farming has the lowest value in water use. Guzmán-Soria *et al.* (2009) reported price elasticity coefficients for the urban, livestock, irrigation agriculture and industrial in Guanajuato. The coefficients were -0.0150, -0.0038, -0.052 and -0.126,

Table 2. Water allocation among users and the increase in the price within a water scarcity scenario.

Municipality	R [†]	C [‡]	I [§]	F [¶]	G [‡]	R [†]	C [‡]	I [§]	F [¶]	G [‡]
	Millions of m ³					MXN \$ m ⁻³				
	Base model use					Base model price				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.84	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	584.6	5.7	7.15	51.16	59.82	0.20	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.8	0.0	8.28	6.68	9.71	0.18	0.19
Total	197.3	21.7	16.7	755.4	5.7					
	Availability reduced by 10 %									
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.57	80.09	83.82		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.95	66.94	64.55		
Ensenada	9.0					14.19				
Mexicali	63.3	4.2	4.7	569.2	5.6	7.19	51.20	59.86	0.24	0.23
SLRC	24.5	2.0	0.7	166.3	0.0	8.32	6.72	9.75	0.22	0.23
Total	197.1	21.7	16.7	735.5	5.6					
	Difference to the base scenario									
Tijuana	0	0	0			0.04	0.04	0.04		
Tecate	0	0	0			0.04	0.10	0.04		
Ensenada	0					0.04				
Mexicali	-0.1	0	0	-15.4	-0.1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
SLRC	0	0	0	-4.5	0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Total	-0.2	0	0	-19.9	-0.1					
	Difference to the base scenario (%)									
Tijuana	0.0	0.0	0.0			0.2	0.0	0.0		
Tecate	-0.1	0.0	0.0			0.3	0.1	0.1		
Ensenada	-0.1					0.3				
Mexicali	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4	0.6	0.1	0.1	20.0	21.0
SLRC	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4	0.5	0.6	0.4	22.0	21.1
Total	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4					

R[†]: residential sector; C[‡]: commercial sector; I[§]: industrial sector; F[¶]: agricultural sector; G[‡]: livestock sector. MXN \$: Mexican pesos.

respectively. These showed that the agricultural sector would reduce their demand for water in greater magnitude in response to a price increase. The same takes place in the Comarca Lagunera (Mexico's most noticeable milk production region), according to the price elasticities of demand found by Guzmán-Soria *et al.* (2006). The elasticities were -0.108 for pump irrigation agriculture, -0.023 for gravity irrigation, -0.003 for urban zone, -0.002 for livestock farming and -0.178 for the industry. These indicate that irrigation agriculture has one of the highest elasticities, which means that should prices increase, the amount of water needed for agriculture would be reduced in a greater

percentage than in the majority of the other sectors examined. It is worth mentioning that the effects reported by other authors were different in magnitude compared to those found in this research, which is probably due to spatial and temporal conditions in each study.

The decline in water consumption by consumer sector and by municipality basically responds to an increase in the price of water. For example, for the residential sector it fluctuated between 0.2 and 0.6 %; within the commercial sector, from 0 to 0.6 %; and in the industrial sector, from 0 to 0.4 %. This is why, despite a 10 % decrease in water supply, water use in those industries remained essentially constant. Meanwhile, in the agricultural sector of the municipality of Mexicali, the price increased from 0.20 to 0.24 MXN \$ m⁻³ (20 % compared to the base model) and in SLRC, the rise was from 0.18 to 0.22 MXN \$ m⁻³ (22 % in regard to the base model). Similarly, for the livestock farming sector in Mexicali and SLRC, the price increased from 0.19 to 0.23 MXN \$ m⁻³, a 21 % increase in regard to the base model (Table 2). The findings showed that the agricultural and livestock farming sectors would be most impacted by a decrease in water supply, both in terms of use and price, since water use declines in a greater proportion than in the other sectors evaluated due to an increase in water price.

The GDP of the state of Baja California in 2019 was 575.8 billion MXN \$, a value relatively constant since 2013, out of which the primary, secondary and tertiary activities contributed 15.5, 221.2 and 339.1 billion MXN \$, respectively (INEGI, 2021d). Regarding water use, the primary sector is the one which uses the greatest amount of water, yet it contributes the least to the GDP of the state. The other non-agricultural sectors use less water but their contribution to the GDP is higher; consequently, facing water scarcity or reduction in the amount of water in the aquifers, the extracted water would be allocated to the sectors with the highest water use value (Ghosh *et al.*, 2017). In the case of the municipalities of Baja California, it would be possible to transfer water from the municipality of Mexicali with agricultural purposes to Tijuana due to the dynamism of activities in the residential, commercial and industrial sectors. This is consistent with the statement made by Scott *et al.* (2012), that a lack of additional water sources in areas with a growing demand for water can lead to a reallocation from agriculture towards other consumer sectors. The reallocation of water between sectors can benefit some and harm others (Elbakidze *et al.*, 2018). In the municipalities analyzed, Tijuana could be benefitted while Mexicali and SLRC could be harmed. To avoid this situation, it would be advised to take regulations and restrictions into account when transferring water from one sector to another, as well as carrying out research to determine the optimal water consumption in Mexicali's agricultural sector to define the transfer limits towards residential, commercial and industrial sectors of Tijuana. It is then evident that more research on the subject is required.

The reduction of the overexploitation of aquifers and underground water is desirable, in order to avoid problems like those aforementioned and to prevent jeopardizing the expansion of the economic sectors that support a state or a country. Based on the model, the reduction in the sectors with the highest demand for water such as

agriculture and livestock farming in the municipalities of Mexicali and SLRC is a feasible path, since they use the greatest amount of water and less contribute to the GDP. Additionally, both industries pay very little for water, thus it makes sense to raise prices by 20 and 22%, respectively, even if the increase is greater than this percentage. For example, if the price increased by 100 %, the demand for water in the agricultural sector would be reduced more than 10 %, which is desirable considering the overexploitation of aquifers.

The results of this study are similar to those found by other authors in Mexico. García-Salazar *et al.* (2006) indicated that a 98.6 % increase in the price of water is required in the agricultural sector in order to reduce 10 % water extractions in the Comarca Lagunera. They stated that such a rise in the price could be achieved by eliminating or reducing the subsidies in this sector, for example, increasing the price of electricity, which is the primary input for water pumping. The increase in price would encourage farmers to save water by introducing technology into their crops and irrigation systems, such as subsurface drip irrigation. Therefore it is possible to increase the price in order to reduce the demand for water in the agricultural sector in the studied region.

Ramírez *et al.* (2019) indicated that in many of the irrigation districts of Mexico, water is not charged by volume, but by hectare. They stated that farmers pay a fee that does not reflect the real price of water; consequently, an inefficient use of water is made. They concluded that to encourage effective water use, a higher tariff must be established than the one already in place. García-Salazar *et al.* (2006), Ramírez *et al.* (2019) and the findings of this study all agreed that the price of water should be raised in the agricultural sector to significantly reduce water extractions from aquifers.

Such a recommendation must consider the inelasticity that characterizes the water demand in response to price changes. The demand for water in all sectors is inelastic, since there are no substitute goods, and the value of the price elasticity of the demand in the different sectors depends on reducing water use when the price changes. Results in this study indicate that if water availability was to decrease, water use should also decrease in agriculture, the sector in which water price is the lowest. As indicated before, it is technically possible to reduce the demand for water in this sector. A reduction in water demand shall have positive effects on the region. The lower water use shall reduce the pressure on water resources of the region, it shall not be an obstacle for its economic development.

On the contrary, keeping water prices low in the agricultural sector of the municipalities of Mexicali and SLRC encourages an irrational and inefficient use of water; it may hinder the development of other sectors such as water for residential, commercial and industrial uses in the other municipalities of the state of Baja California. Particularly the municipality of Tijuana, where those sectors are relevant. Price becomes an important instrument in regions with water scarcity, like some cities in the north of Baja California that lack local sources for water supply. Low water prices can be related to a high level of consumption which exert pressure on the water resources, and they usually create critical events regarding water supply in times of scarcity.

In addition to rely on water prices as a measure to use water efficiently, other additional measures can be applied in some sectors. For example, in the farming sector in Mexicali and SLRC, along with the introduction of new technologies in crop irrigation, treated water from other municipalities could be used. The commercial and industrial sectors would reuse volumes by implementing water treatment. In the residential sector water use may be reduced with water-saving technology in showers, toilets and sinks, as well as changing water use habits such as quick showers or reusing water from washing machines, among others.

CONCLUSIONS

The analysis of a reduction in the supply of water indicated that if the consumption and the price increases by consumer sectors, the agricultural and livestock farming sectors of the municipalities of Mexicali and San Luis Río Colorado can be the most affected, due to farming sector which has the lowest price value in the use of water. Based on overexploitation of the aquifers in the region and the low prices paid by different water users in Mexicali and San Luis Río Colorado, the recommendation would be to use water price as a mechanism to reduce the demand for water use, in order to reduce water extracted.

If water reallocation and water use value are considered within the consumer sectors, a reduction in water supply would benefit residential, commercial and industrial sectors of Tijuana; although it may harm the farming sector of both Mexicali and San Luis Río Colorado. Therefore, it is recommendable for water-related decision-makers to consider regulations or restrictions, mainly to avoid harms on the agricultural sector.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (National Science and Technology Council - CONACYT) for granting the funds for Science PhD studies to Fidel Bautista Mayorga.

REFERENCES

- Atucha AJ, Gualdoni P. 2018. El funcionamiento de los mercados. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. <http://nulan.mdpu.edu.ar/2879/1/atucha-et-al-2018.pdf> (Retrieved: June 2022).
- Castro R JC, Cruz G FV, Magaña Z JD, Martínez A G, Reyes M A, Sainz Z RO. 2017. La demanda del agua y su asignación eficiente en la agricultura: un caso en Guanajuato, México. *Economía Coyuntural* 2 (2): 145–180. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2415-06222017000200005&lng=es&tlng=es (Retrieved: May 2021).
- CEABC (Comisión Estatal del Agua de Baja California). 2017. Informe mensual diciembre 2017. [http://www.cea.gob.mx/documents/indicadores/CIERRE %20DE %20INDICADORES %202017.pdf](http://www.cea.gob.mx/documents/indicadores/CIERRE%20DE%20INDICADORES%202017.pdf) (Retrieved: June 2021).
- CEABC (Comisión Estatal del Agua de Baja California). 2018. Programa hídrico del Estado de Baja California. [http://www.cea.gob.mx/phebc/resejec/RESUMEN %20EJECUTIVO %20PHEBC.pdf](http://www.cea.gob.mx/phebc/resejec/RESUMEN%20EJECUTIVO%20PHEBC.pdf) (Retrieved: March 2021).
- CEABC (Comisión Estatal del Agua de Baja California). 2021. Indicadores OOA. <http://www.cea.gob.mx/indicadores.html> (Retrieved: May 2022).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Estadísticas del agua en México. Edición 2018. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf (Retrieved: January 2021).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2019. Acuíferos por región hidrológico-administrativa. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuíferos&ver=reporte> (Retrieved: January 2021).

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2020. Disponibilidad por acuíferos. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html (Retrieved: February 2021).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2021. Recaudación de la CONAGUA. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=recaudacion&ver=mapa&o=0&n=nacional> (Retrieved: August 2021).
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2018. Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas 2016–2050. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050> (Retrieved: February 2021).
- CONASAMI (Comisión Nacional de los Salarios Mínimos). 2021. Tabla de Salarios Mínimos Generales y Profesionales por Áreas Geográficas. <https://www.gob.mx/conasami/documentos/tabla-de-salarios-minimos-generales-y-profesionales-por-areas-geograficas?idiom=es> (Retrieved: March 2021).
- Cota-Verdugo LF, Beltrán-Morales A, Troyo-Diéguez E, García-Hernández JL, Beltrán-Morales LF, Hernández-Trejo VA, Ortega-Rubio A, Navarro BA. 2013. Mercado de derechos de agua para uso agrícola en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4 (1): 63–75. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000100005 (Retrieved: March 2021).
- Elbakidze L, Vinson H, Cobourn K, Taylor RG. 2018. Efficient groundwater allocation and binding hydrologic externalities. *Resource and Energy Economics* 53: 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2018.05.002>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia: opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/captacion_agua_de_lluvia.pdf (Retrieved: July 2021).
- García-Salazar JA, Guzmán-Soria E, Fortis-Hernández M. 2006. Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia* 40 (2): 269–276. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/461> (Retrieved: September 2021).
- Ghosh S, Ibararán ME, Willett KD, Sanchez T EG. 2017. Water allocation and management along the Santa Cruz border region. *Water Resources and Economics* 19: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2017.09.004>
- Gómez-Ugalde SG, Mora-Flores JS, García-Salazar JA, Valdivia-Alcalá R. 2012. Demanda de agua para uso residencial y comercial. *Terra Latinoamericana* 30 (4): 337–342. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1089/1335> (Retrieved: March 2021).
- Guzmán-Soria E, García-Salazar JA, Mora-Flores JS, Fortis-Hernández M, Valdivia-Alcalá R, Portillo-Vázquez M. 2006. La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia* 40 (6): 793–804. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/510> (Retrieved: September 2021).
- Guzmán-Soria E, Hernández-Martínez J, García-Salazar JA, Rebollar-Rebollar S, de la Garza-Carranza MT, Hernández-Soto D. 2009. Consumo de agua subterránea en Guanajuato, México. *Agrociencia* 43 (7): 749–761. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/759> (Retrieved: October 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021a. Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), Población de 15 y más años de edad. <https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/default.html#Tabulados> (Retrieved: February 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021b. México en cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=02> (Retrieved: June 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021c. Censos económicos 2019. https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Datos_abiertos (Retrieved: June 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021d. Publicaciones. <https://www.inegi.org.mx/app/publicaciones/> (Retrieved: August 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021e. Banco de Información Económica (BIE). <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0#divFV472180> (Retrieved: August 2021).
- Kawaguchi T, Suzuki N, Kaisier HM. 1997. A Spatial Equilibrium Model for Imperfectly Competitive Milk Markets. *American Journal of Agricultural Economics* 79: 851–859. <https://doi.org/10.2307/1244426>
- Mayta A, Durán A. 2015. Sobre-explotación de aguas subterráneas en Punata: causas y efectos. Reporte de investigación. <https://docplayer.es/57974867-Sobre-explotacion-de-aguas-subterranas-en-punata-causas-y-efectos.html> (Retrieved: January 2021).
- Miranda-Trejo M, Ocampo-Fletes I, Escobedo-Castillo JF, Hernández-Rodríguez ML. 2015. La distribución del agua potable en Tepexi de Rodríguez, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 12 (3): 261–277. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=51870-54722015000300001&script=sci_abstract (Retrieved: May 2021).
- Palacios-Vélez OL, Escobar-Villagrán BS. 2016. La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7 (2): 5–16. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353545556001> (Retrieved: February 2021).

- Ramírez B BA, González E A, Valdivia A R, Salas G JM, García S JA. 2019. Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 539–550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Romano G, Salvati N, Guerrini A. 2016. An empirical analysis of the determinants of water demand in Italy. *Journal of Cleaner Production* 130: 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.141>
- Scott CA, Megdal S, Oroz LA, Callegary J, Vandervoet P. 2012. Effects of climate change and population growth on the transboundary Santa Cruz aquifer. *Climate Research* 51: 151–170. <https://doi.org/10.3354/cr01061>
- SIACON-SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta–Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera). 2020. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430> (Retrieved: July 2021).
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2021. Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> (Retrieved: August 2021).
- Torres-Sombra J, García-Salazar JA, García-Mata R, Matus-Gardea J, González-Estrada E, Pérez-Zamorano A. 2013. Respuesta de la demanda de agua a cambios en el precio: un estudio por tipo de consumidor en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 47 (3): 293–307. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1020> (Retrieved: March 2021).
- Torres-Sombra J, García-Salazar JA. 2015. Uso del agua en el norte de Sinaloa: ¿a cuál consumidor asignar el recurso? *Tecnología y Ciencias del Agua* 6 (1): 167–173. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353539900010> (Retrieved: June 2021).

Annex I

Based on the economic theory (Atuch and Gualdoni, 2018) and on empirical evidence (Gómez-Ugalde *et al.*, 2012; Torres-Sombra *et al.*, 2013; Romano *et al.*, 2016), the following multiple linear regression models were formulated to estimate the price elasticities of the demand in residential, commercial and industrial sectors in the municipality of Tijuana:

For residential:

$$CPAR_t = f(PAR_t, PEER_t, INGR_t, CPAR_{t-1}, TEM_t, PP_t) \quad (11)$$

where $CPAR_t$ is the consumption per capita of water for residential; PAR_t is the real price of water for residential; $PEER_t$ is the real price of electricity for residential; $INGR_t$ is the real income (the general minimum wage was used as an approximate variable to the income); $CPAR_{t-1}$ is the consumption per capita of water for residential with a delay period; TEM_t is the average temperature; PP_t is the average rainfall.

For the commercial sector:

$$CPAC_t = f(PAC_t, CPAR_{t-1}) \quad (12)$$

where $CPAC_t$ is the consumption per capita of water for commercial use; PAC_t is the real price of water for commercial use; $CPAC_{t-1}$ is the consumption per capita of water for commercial use with a delay period.

For the industrial sector:

$$CPAI_t = f(PAI_t, PEEI_t, PIBAS_t) \quad (13)$$

where $CPAI_t$ is the consumption per capita of water for industrial use; PAI_t is the real price of water of industrial use; $PEEI_t$ is the real fee of electricity of industrial use; $PIBAS_t$ is the gross domestic product of secondary activities of the state of Baja California.

These regressions considered explanatory variables that turned out to be more ($p \leq 0.05$) significant. The price elasticity of the water demand for residential, commercial and industrial sectors in the municipality of Tijuana were taken from the estimated parameters and the mean price value of water per type of use. The demand functions used in the programming model at a municipality level were obtained using the price elasticities of the demand, along with demand prices and amounts. Based on Kawaguchi *et al.* (1997), the slope and the intercept were obtained as follows:

$$Y_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_{ij} P_{ij} \quad (14)$$

Equation 14 is the function of demand by water consumer sector (*i*) and municipality (*j*).

$$\beta_{ij} = \varepsilon_{ij}^{pd} \frac{Y_{ij}}{P_{ij}} \quad (15)$$

Equation 15 was used to estimate the slope of the function of the demand, where β_{ij} is the slope of the demand by consumer sector *i* (residential, commercial, industrial, agricultural and livestock) and municipality *j* (Tijuana, Tecate, Ensenada, Mexicali and SLRC); ε_{ij}^{pd} is the price elasticity per consumer sector and per municipality; Y_{ij} is the amount of water consumed by consumer sector and by municipality; P_{ij} is the price or fee of water per consumer sector and per municipality.

$$\alpha_{ij} = Y_{ij} - \beta_{ij} P_{ij} \quad (16)$$

Equation 16 was used to estimate the intercept of the function of the demand, and it was obtained through the values of the slope, the amount of demand and the price for the consumer.

$$P_{ij} = \frac{-\alpha_{ij}}{\beta_{ij}} + \frac{1}{\beta_{ij}} Y_{ij} = \lambda_{ij} + w_{ij} y_{ij} \quad (17)$$

Equation 17 represents the reverse function of the demand function, and it was obtained by solving the price in Equation 14.

$$AUDC = \lambda_{ij} y_{ij} + \frac{1}{2} w_{ij} y_{ij}^2 \quad (18)$$

Equation 18 was used to estimate the area under the demand curve (AUDC), which appears in the target function of the model; it was obtained by the integral of Equation 14.

CONSUMO Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA REGIÓN NORTE DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Fidel Bautista-Mayorga¹, José Alberto García-Salazar^{1*}, José Saturnino Mora-Flores¹,
Silvia Xochilt Almeraya-Quintero¹, Mercedes Borja-Bravo²

¹ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Programa de Socioeconomía, Estadística e Informática-Economía. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Pabellón. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, Aguascalientes, México. C. P. 20671.

* Autor para correspondencia: jsalazar@colpos.mx

RESUMEN

El crecimiento demográfico y económico en el norte del estado de Baja California, México, ha ocasionado un aumento en el consumo de agua y una competencia por el recurso entre los distintos sectores consumidores. El dinamismo de la región ha originado que el abastecimiento de la demanda de agua sea cada vez más difícil. Esta investigación tuvo como objetivo asignar el agua extraída de los acuíferos Valle de Mexicali y San Luis Río Colorado (SLRC), ante un escenario de escasez del recurso hídrico, entre los diferentes sectores consumidores de agua por municipio de los estados de Baja California y Sonora, así como determinar el precio que hace posible disminuir la cantidad extraída de los acuíferos. Se formuló y validó un modelo de equilibrio espacial que consideró oferta fija y funciones de demanda. Los resultados en 2019 indican que la demanda total de los municipios en el sector residencial, comercial, industrial, agrícola y pecuario fue 197.2, 21.7, 16.7, 758 y 5.7 hm³ de agua, de los cuales Tijuana destaca en los tres primeros sectores, mientras que Mexicali y SLRC sobresalen en el sector agropecuario. Respecto al precio del agua, los municipios de Tijuana, Tecate y Ensenada pagan una tarifa alta por su uso. En contraste, Mexicali y SLRC pagan las tarifas más bajas. Una disminución de 10 % en la disponibilidad hídrica se lograría si el precio en el sector agrícola de Mexicali y SLRC aumentase en 20 y 22 %, respecto al modelo base. Al subir el precio, la demanda en este sector para los dos municipios disminuiría en 2.6 %.

Palabras clave: sector residencial, comercio, industria, agricultura, ganadería, modelo de equilibrio espacial.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se estima una disponibilidad de agua promedio anual de 1386 billones de hm³, 97.5 % de ella es agua salada (1351 billones de hm³) y 2.5 % es agua dulce (35 billones de hm³). Del agua dulce, aproximadamente el 70 % (24.4 billones de hm³) no es aprovechable para el consumo humano, al encontrarse en glaciares, nieve y hielo; el 30 % (10.5 billones de hm³) es agua subterránea y 0.4 % (0.14 billones de hm³) se

Citation: Bautista-Mayorga F, García-Salazar JA, Mora-Flores JS, Almeraya-Quintero SX, Borja-Bravo M. 2022. Consumo y abastecimiento de agua en la región norte de Baja California, México.

Agrociencia. 56(7): 1372-1403. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2547>

Editor in Chief:

Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: September 29, 2021.

Approved: August 30, 2022.

Published in Agrociencia:

November 11, 2022.

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



encuentra en lagos, ríos y humedales. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) indica que la distancia entre el agua y los centros de consumo es uno de los factores que determina que el ser humano sólo tenga acceso al 0.77 % del agua dulce que existe en el mundo. México recibe 1.4 millones de hm^3 anuales en forma de precipitación, de la cual 72.1 % es evapotranspirada, 21.4 % escurre por ríos y el 6.4 % recarga los acuíferos por infiltración. Considerando la importación y exportación de agua con países vecinos, México tiene anualmente un saldo positivo de 451 585 hm^3 de agua renovable (CONAGUA, 2018).

La sobreexplotación de agua subterránea acarrea diversos efectos negativos, entre los que se pueden mencionar el descenso significativo y continuo del nivel freático que repercute directamente en la reducción de los caudales de bombeo, el incremento de los costos de operación y perforación de nuevos pozos, la generación de fisuras y colapso del suelo producto del vacío creado en los estratos superficiales, y una mayor competencia y conflictos entre los diferentes usuarios del agua (Mayta y Durán, 2015). Los sectores consumidores de agua (agropecuario, industrial, comercial y residencial) abonan al problema de la sobreexplotación del agua, pues su crecimiento ejerce presión sobre los recursos naturales (agua, suelo, subsuelo). El agotamiento del agua potable y los demás recursos naturales significaría una catástrofe para la humanidad; por ello es urgente hacer un plan y una supervisión sobre el uso eficiente del agua (Palacios-Vélez y Escobar-Villagrán, 2016).

La Península de Baja California es la cuarta región hidrológica administrativa de las 13 que existen en el país con más acuíferos sobreexplotados, sólo por debajo de las regiones Lerma Santiago Pacífico, Cuenca Central del Norte y Río Bravo. En 2011, se reportaron 13 acuíferos sobreexplotados y 10 con intrusión marina; y para 2019 se incrementó a 18 sobreexplotados y 11 con intrusión marina. De esta región hidrológica, destacan los municipios de Mexicali (Baja California) y San Luis Río Colorado (SLRC, en Sonora) por ser grandes consumidores de agua, especialmente en el sector agrícola, pertenecientes al distrito de riego 014 (CONAGUA, 2019). En 2019, de los 602 hm^3 del acuífero sobreexplotado de Valle de Mexicali, el sector agrícola de Mexicali consumió 588 hm^3 de agua, y de los 263.5 hm^3 del acuífero Valle de SLRC, el cual se encuentra cerca de la sobreexplotación, el sector agrícola de SLRC consumió 170 hm^3 (CONAGUA, 2020).

Tijuana sobresale por el dinamismo demográfico, comercial e industrial. En 2019, Baja California tenía una población total aproximada de 3.6 millones de personas, de los cuales el 49 % (1.8 millones de personas) se concentraron en Tijuana y 30 % en Mexicali. De acuerdo con información del Consejo Nacional de Población (CONAPO), se proyecta que la población de Tijuana crecerá 19.5 % en el periodo 2019-2030 (CONAPO, 2018). El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) evidenció el dinamismo en el sector comercial e industrial en Tijuana, ya que el 97.2 % de la Población Económicamente Activa (PEA) se encontraba ocupada durante el segundo trimestre de 2019. El 59.4 % se desenvolvía dentro del sector terciario (comercios, restaurantes y servicios de alojamiento, entre otros), 34.3 % laboró en el sector secundario (industrias

extractiva, eléctrica y manufacturera, entre otros), mientras que el 6.2 % de los trabajadores no especificaron la actividad económica en el que se encontraban ocupados (INEGI, 2021a).

La Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEABC) indica que Tijuana (incluyendo Playas de Rosarito), Tecate y una parte de Ensenada, abastecen su demanda de agua gracias a las concesiones que tienen asignadas de los acuíferos antes mencionados. El agua es transportada por el Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) hasta llegar a las presas El Carrizo y Las Auras (CEABC, 2018). El crecimiento de la población y los sectores económicos implican mayor demanda de agua y un aumento en la sobreexplotación de los acuíferos; ante tal situación se vislumbran soluciones probables. Por un lado, aumentar el suministro de agua para satisfacer la creciente demanda de agua, por otro lado, administrar y reducir la demanda para disminuir la presión sobre los recursos hídricos de la región.

Palacios-Vélez y Escobar-Villagrán (2016) propusieron las siguientes medidas que ayudan a minimizar la sobreexplotación de los acuíferos: actualizar el censo de pozos de bombeo, estimar el volumen extraído de manera clandestina, realizar estudios sobre los componentes del balance hídrico, promover la formación de un comité técnico de aguas subterráneas que se encargue del manejo del acuífero, fomentar una cultura de pago por los servicios de agua tanto en ciudades como en las zonas de riego, reducción de los subsidios a los servicios de agua de riego y de abastecimiento urbano, entre otros.

Existen estudios que han determinado que se puede usar el precio del agua (tarifas) como mecanismo para disminuir la demanda y hacer un uso más eficiente del recurso en diferentes sectores consumidores (Gómez-Ugalde *et al.*, 2012; Torres-Sombra *et al.*, 2013; Cota-Verdugo *et al.*, 2013; Romano *et al.*, 2016). Otros estudios se han enfocado en asignar el agua de manera espacial e inter temporal entre los sectores consumidores ante una situación de escasez y competencia por el recurso (Miranda-Trejo *et al.*, 2015; Castro *et al.*, 2017).

Ante una disminución en la disponibilidad de agua, algunos sectores tendrán que disminuir su consumo y su precio aumentaría. Aunque el agua es un bien necesario para todos los sectores consumidores, dicha disminución se observará en aquellos sectores donde el agua tiene el menor valor de uso. En términos económicos, el mayor valor de agua se observará en aquellos sectores con la demanda más inelástica, como el sector residencial, en donde el consumidor final es un ser vivo y no hay posibilidad de reducir el consumo per cápita. La demanda de agua en el sector residencial será más inelástica en colonias de bajos ingresos, en donde el consumo de agua es mínimo, lo cual determina que la demanda no disminuya, aún con un considerable aumento en el precio. Una situación similar se observará en la ganadería, sector en donde el consumidor final también es un ser vivo en movimiento.

El menor valor se observará en los sectores en donde la demanda es menos inelástica, como el sector agrícola, en donde técnicamente es posible reducir el consumo si se utilizan métodos de riego más eficientes en el uso del agua. En este sector un aumento

en el precio del agua puede incitar al productor agrícola a hacer un uso más eficiente del recurso; el aumento del precio puede motivar la adopción de sistema de riego tecnificados que permitan un ahorro de agua por unidad de superficie e incluso se podría aumentar la productividad de la agricultura de riego. El precio del agua puede proporcionar información al productor sobre el valor y la escasez del recurso, y puede inducir a los agricultores para cambiar sus patrones de cultivo. Las plantas son seres vivos a los cuales se puede conducir hacia el uso eficiente del agua. Algo similar pasa en el sector industrial, donde un aumento en el precio puede motivar al empresario a adoptar sistemas de reciclaje del agua utilizada en los procesos industriales, permitiendo un ahorro considerable de agua y disminuyendo el consumo.

La reasignación del agua buscará aumentar el Valor Social Neto (VSN). Es usual que las técnicas de optimización espacial a escala de cuencas para evaluar los beneficios y costos relativos de la asignación de agua que se apliquen a nivel regional. La maximización del valor social neto obtenido del uso del agua en todos los sectores bajo las restricciones pertinentes, daría como resultado niveles óptimos del uso del agua en cada sector; así como beneficios económicos del uso del agua y costos de oportunidad de la asignación del agua dentro y entre los sectores productivos de la región (Ghosh *et al.*, 2017).

Dado el contexto anterior, este estudio tuvo como objetivo asignar el agua extraída de los acuíferos Valle de Mexicali y SLRC ante un escenario de escasez del recurso hídrico, entre los diferentes sectores consumidores de agua por municipio de los estados de Baja California y Sonora, así como determinar el precio que haría posible disminuir la cantidad extraída de los acuíferos. La hipótesis estableció que ante escenarios de escasez disminuiría el consumo de agua en aquellos sectores con menor valor de uso.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo de programación cuadrática maximiza el VSN, que es igual a la suma de las áreas bajo la curva de demanda menos los costos de extracción de agua subterránea, el valor de la cantidad de agua disponible en la presa para derivación y los costos de distribución.

Si suponemos r regiones consumidoras de agua del sector residencial ($r = 1 \dots R = 5$), c regiones consumidoras de agua del sector comercial ($c = 1 \dots C = 4$), i regiones consumidoras de agua del sector industrial ($i = 1 \dots I = 4$), f regiones consumidoras de agua del sector agrícola ($f = 1 \dots F = 2$), g regiones consumidoras de agua del sector pecuario ($g = 1 \dots G = 2$), s fuentes de agua subterránea ($s = 1 \dots S = 2$) y, p presas ($p = 1 \dots P = 2$), el modelo que se propone es el siguiente:

$$\begin{aligned} MAXV \text{ SN} = & \sum_{r=1}^R \left[\lambda_r y_r + \frac{1}{2} w_r y_r^2 \right] + \sum_{c=1}^C \left[\lambda_c y_c + \frac{1}{2} w_c y_c^2 \right] + \sum_{i=1}^I \left[\lambda_i y_i + \frac{1}{2} w_i y_i^2 \right] \\ & + \sum_{f=1}^F \left[\lambda_f y_f + \frac{1}{2} w_f y_f^2 \right] + \sum_{g=1}^G \left[\lambda_g y_g + \frac{1}{2} w_g y_g^2 \right] + \sum_{p=1}^P [PAPy_p] \\ & - \sum_{s=1}^S [PASX_s] - \sum_{p=1}^P [PAPX_p] - \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R [D_{sr}X_{sr}] - \sum_{s=1}^S \sum_{c=1}^C [D_{sc}X_{sc}] - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I [D_{si}X_{si}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F [D_{sf} X_{sf}] - \sum_{s=1}^S \sum_{g=1}^G [D_{sg} X_{sg}] - \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P [D_{sp} X_{sp}] \\
 & -\sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R [D_{pr} X_{pr}] - \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C [D_{pc} X_{pc}] - \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I [D_{pi} X_{pi}]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Sujeto a:

$$X_s \geq \sum_{r=1}^R X_{sr} + \sum_{c=1}^C X_{sc} + \sum_{i=1}^I X_{si} + \sum_{f=1}^F X_{sf} + \sum_{g=1}^G X_{sg} + \sum_{p=1}^P X_{sp} \tag{2}$$

$$X_p \geq \sum_{r=1}^R X_{pr} + \sum_{c=1}^C X_{pc} + \sum_{i=1}^I X_{pi} \tag{3}$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sr} + \sum_{p=1}^P X_{pr} \geq y_r \tag{4}$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sc} + \sum_{p=1}^P X_{pc} \geq y_c \tag{5}$$

$$\sum_{s=1}^S X_{si} + \sum_{p=1}^P X_{pi} \geq y_i \tag{6}$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sf} \geq y_f \tag{7}$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sg} \geq y_g \tag{8}$$

$$\sum_{s=1}^S X_{sp} \geq y_p \tag{9}$$

$$y_r, y_c, y_i, \dots, X_{sr}, X_{sc}, X_{si}, \dots, X_{sg}, X_{sf}, X_{sp} \geq 0 \tag{10}$$

donde, $\lambda_r, \lambda_c, \lambda_i, \lambda_f, \lambda_g$ son las ordenadas de las funciones inversas de la demanda en las regiones r, c, i, f, g ; y_r, y_c, y_i, y_f, y_g son las cantidades consumidas de agua en los sectores r, c, i, f, g ; $\omega_r, \omega_c, \omega_i, \omega_f, \omega_g$ son las pendientes de las funciones inversas de la demanda de agua en las regiones r, c, i, f, g ; y_p es la cantidad de agua total disponible en la presa p ; PAS es el costo de extracción de agua subterránea en la región s ; PAP es el precio del agua a la salida de la presa p ; X_s es la cantidad de agua extraída en la región s ; X_p es la cantidad de agua disponible en la presa p para derivación; $D_{sr}, D_{sc}, D_{si}, D_{sf}, D_{sg}, D_{sp}$ son los costos de distribución del agua de s a r, c, i, f, g, p ; D_{pr}, D_{pc}, D_{pi} son los costos de distribución del agua de p a r, c, p ; $X_{sr}, X_{sc}, X_{si}, X_{sf}, X_{sg}, X_{sp}$ son las cantidades de agua subterránea enviada de s a r, c, i, f, g, p ; X_{pr}, X_{pc}, X_{pi} son las cantidades de agua derivada desde p a r, c, i .

La función objetivo (Ecuación 1) está sujeta a restricciones de balance de oferta y demanda de agua (Ecuaciones 2 a 9). La condición de no negatividad de las variables está representada en la Ecuación 10.

La solución del modelo se obtuvo usando funciones de demanda para los sectores de consumo residencial, comercial, industrial, agrícola y pecuario. Con la elasticidad del precio de la demanda, las tarifas y las cantidades demandadas se estimó un total de 17 funciones de demanda para los cinco municipios (Tijuana, Tecate, Ensenada, Mexicali y SLRC) y los cinco sectores consumidores (residencial, comercial, industrial, agrícola y pecuaria) (Kawaguchi *et al.*, 1997). Las elasticidades se estimaron vía regresión lineal múltiple para el municipio de Tijuana, como representativo de Baja California. El consumo *per capita* de agua se consideró como variable endógena; en tanto que el precio del agua y energía eléctrica, ingreso, precipitación y temperatura se consideraron como variables exógenas. Los datos de las variables utilizadas en la regresión abarcaron el periodo 2006-2019. Los coeficientes de elasticidad estimados fueron -0.23 para el sector residencial, -0.04 para el sector comercial, -0.07 para el sector industrial, y de Torres-Sombra y García-Salazar (2015) se obtuvo una elasticidad para el sector agrícola de -0.125 y de -0.065 para el sector pecuario.

El consumo de agua residencial, comercial e industrial para el municipio de Tijuana se obtuvo de la CEABC (2021). Para los municipios Tecate, Ensenada, Mexicali y SLRC el consumo residencial se estimó del siguiente modo, número de viviendas por el consumo promedio *per capita* de agua, esta información provino de la CEABC (2017) e INEGI (2021b). El consumo de agua comercial e industrial para Tecate, SLRC y Mexicali se obtuvo como resultado de la multiplicación del número de comercios e industrias (en Tecate y SLRC), así como el número de tomas de agua potable de uso comercial e industrial (en Mexicali), por el consumo promedio *per capita* de agua comercial e industrial, respectivamente, la información se obtuvo de la CEABC (2017) e INEGI (2021c).

El consumo de agua agrícola en los municipios de Mexicali y SLRC provino de CONAGUA (2020). En 2019, el consumo de agua pecuario en los municipios de Mexicali y SLRC se obtuvo con la multiplicación del número de cabezas por especie pecuaria por el promedio del consumo *per capita* de agua de cada especie; la información provino de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2013) y del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta-Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera (SIACON-SIAP, 2020). Es importante recalcar que en los municipios de Tijuana, Tecate y una parte de Ensenada no se tomó en cuenta el consumo de agua para el sector agropecuario, porque el que llega a estos municipios provenientes de las presas (El Carrizo y Las Auras) y que a su vez estas reciben de las fuentes subterráneas (acuíferos Valle de Mexicali y SLRC) tienen un uso exclusivo para los sectores residencial, comercial e industrial.

Para los sectores que se abastecen directamente de las fuentes subterráneas (Mexicali y SLRC) los costos de distribución se calcularon por medio de una diferencia de precios (la tarifa que pagan los usuarios finales menos los costos de extracción); dicha diferencia representa todos los costos que involucra el abastecimiento de agua. De manera similar, para los sectores que son abastecidos con el agua disponible en las presas (Tijuana, Tecate y parte de Ensenada), se calculó la diferencia de precios con las tarifas

pagadas por los consumidores finales y los costos del agua a la salida de la presa (que incluyen los costos de extracción de agua, de energía eléctrica, mantenimiento y operación para conducir el agua desde los puntos de extracción a las presas); la información provino de la CEABC (2018) y CONAGUA (2021).

Los datos sobre tarifas de la energía eléctrica provinieron del INEGI (2021d), el ingreso (el salario mínimo general) provino de la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (CONASAMI, 2021), el Producto Interno Bruto (PIB) de las actividades secundarias del estado de Baja California provino del INEGI (2021e) y la precipitación y la temperatura promedio nacional provinieron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La validación del modelo tanto del consumo como del precio del agua en los municipios de Baja California y Sonora (SLRC), así como para los distintos sectores consumidores de agua residencial, comercial, industrial, agrícola y pecuario (R, C, I, F, G) se presentan en el Cuadro 1. El signo positivo y negativo en las diferencias porcentuales, significa que el modelo base sobre o subestima los valores observados; aun así, la diferencia es mínima, lo que permite realizar escenarios predictivos.

En 2019, el consumo total de agua en el sector residencial fue 197.2 hm³, de los cuales Tijuana y Mexicali consumieron 98.5 y 63.4 hm³. El consumo total en el sector comercial fue 21.7 hm³, de los cuales Tijuana y Mexicali demandaron 15.4 y 4.2 hm³, respectivamente. De manera similar, el consumo total en el sector industrial fue 16.7 hm³ y de esta cantidad Tijuana y Mexicali demandaron 10 y 4.7 hm³, respectivamente. El sector agrícola demandó en total 758 hm³ de agua, de los cuales Mexicali es por mucho el mayor consumidor con 588 hm³ de agua, el restante es lo que consume SLRC. Además, el consumo total de agua en el sector pecuario fue ligeramente superior a los 5.7 hm³; de esta cantidad, Mexicali consumió la mayor parte 5.7 hm³, el restante corresponde a SLRC (Cuadro 1).

En referencia a los precios de agua, se aprecia que los municipios Tijuana, Tecate y parte de Ensenada son los que pagan las tarifas más elevadas en el sector residencial, comercial e industrial en el estado de Baja California. Por ejemplo, las tarifas que paga Tijuana en estos sectores fueron 19.5, 80.0 y 83.8 MXN \$ m⁻³, respectivamente. Mexicali y SLRC son los que pagan tarifas de agua más bajas, Mexicali paga 7.2, 51.2 y 59.8 MXN \$ m⁻³ para uso residencial, comercial e industrial, mientras que SLRC paga 8.3, 6.7, 9.7 MXN \$ m⁻³ para estos mismos sectores. Es evidente que este último municipio, perteneciente al estado de Sonora, es el que paga menos por el uso del agua (Cuadro 1).

Pagar precios bajos por el uso del agua fomenta un mal uso del recurso e implica un mayor consumo de agua de acuíferos sobreexplotados, lo cual conlleva el riesgo de crisis hídrica en corto, mediano y largo plazos. Para evitar esta situación es importante que se pague un precio por el agua, ya que esto permitiría el uso más eficiente del recurso y menos presión sobre los acuíferos. Los altos precios que existen específicamente en los municipios de Baja California están relacionados estrechamente con

Cuadro 1. Validación del modelo de agua para los municipios de Baja California y Sonora, 2019.

Municipio	R [†]	C [‡]	I [§]	F [¶]	G [‡]	R [†]	C [‡]	I [§]	F [¶]	G [‡]
	Millones de m ³					MXN \$ m ⁻³				
	Consumo observado					Precio observado				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.86	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	588.0	5.7	7.15	51.16	59.82	0.19	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.0	0.0	8.28	6.68	9.70	0.19	0.19
Total	197.2	21.7	16.7	758.0	5.7					
	Consumo modelo base					Precio modelo base				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.84	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	584.6	5.7	7.15	51.16	59.82	0.20	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.8	0.0	8.28	6.68	9.71	0.18	0.19
Total	197.3	21.7	16.7	755.4	5.7					
	Diferencia respecto al observado									
Tijuana	0	0	0			0	0	0		
Tecate	0	0	0			0	-0.02	0		
Ensenada	0					0				
Mexicali	0	0	0	-3.4	0	0	0	0	0.01	0
SLRC	0	0	0	0.8	0	0	0	0.01	-0.01	0
Total	0	0	0	-2.6	0					
	Diferencia respecto al observado (%)									
Tijuana	0.0	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0		
Tecate	0.0	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0		
Ensenada	0.0					0.0				
Mexicali	0.0	0.0	0.0	-0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	0.1
SLRC	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	-3.7	-0.1
Total	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0					

R[†]: sector residencial; C[‡]: sector comercial; I[§]: sector industrial; F[¶]: sector agrícola; G[‡]: sector pecuario. MXN \$: pesos mexicanos.

dos asuntos. El primero, la distancia entre fuentes de origen y sitios de consumo del agua, donde a mayor distancia, mayor es el precio del agua por gastos de conducción y mantenimiento de la infraestructura. El segundo, una alta dependencia de fuentes externas de agua para abastecer la demanda interna, debido a la escasa disponibilidad de agua local.

Se estimaron los efectos sobre el consumo y precio del agua al reducir 10 % la disponibilidad de agua en los acuíferos Valle de Mexicali y SLRC (Cuadro 2). El consumo de todos los sectores consumidores de todos los municipios, incluyendo el agua disponible

en las presas, es igual al agua extraída de ambos acuíferos (no se consideraron pérdidas de agua por la conducción ni por evaporación). En el modelo base se estimó una extracción total de 996.8 hm³. Al contraerse la oferta de agua en la magnitud indicada, pasaría a 897.2 hm³; esta medida traería como consecuencia que la demanda de agua disminuya y el precio del agua aumente.

En este escenario, el consumo de agua en los sectores residencial, comercial e industrial de todos los municipios no sufrió cambios significativos. Por el contrario, en el consumo en el sector agrícola sí ocurrieron cambios notorios. En Mexicali el uso del agua disminuyó de 584.6 a 569.2 hm³ (2.6 % comparado con el modelo base), y en SLRC bajó de 170.8 a 166.3 hm³ (2.6 % respecto al modelo base). En el caso del sector pecuario de Mexicali y SLRC experimentaron una caída en el consumo considerando el modelo base de 1.4 %, respectivamente (Cuadro 2).

Los efectos obtenidos son consecuencia de la magnitud de la elasticidad precio de la demanda observada en cada sector consumidor. Aunque en todos los sectores la demanda es inelástica, existen diferencias en la magnitud del coeficiente de elasticidad en los diferentes sectores.

Los resultados de este estudio concuerdan con los de Ghosh *et al.* (2017), quienes indicaron que ante una disminución en la oferta de agua, el sector agropecuario es el más perjudicado y no los demás sectores consumidores de agua como el residencial, comercial e industrial; esto es así porque el sector agrícola tiene el valor menor en el uso del agua. Guzmán-Soria *et al.* (2009) reportaron coeficientes de elasticidad precio de la demanda inelásticas para los sectores urbano, pecuario, agrícola de riego e industrial en Guanajuato, siendo -0.0150, -0.0038, -0.052 y 0.126, respectivamente. Estos evidenciarían que ante un aumento de precio, el sector agrícola sería uno de los que reduciría en mayor cantidad su demanda de agua. Lo mismo ocurre para la Comarca Lagunera, esto de acuerdo con las elasticidades precio de la demanda que encontraron Guzmán-Soria *et al.* (2006), siendo de 0.108 para la agricultura de riego por bombeo, -0.023 para la agricultura de riego por gravedad, -0.003 para la zona residencial, -0.002 para la ganadería, y -0.178 para la industria. En dichas elasticidades, se puede notar que la agricultura de riego es una de las de mayor elasticidad, lo cual implica que ante un aumento en el precio la cantidad demandada de agua en la agricultura podría reducirse en mayor proporción que en la mayoría de los sectores analizados. Es pertinente mencionar que los efectos reportados por otros autores son diferentes en magnitud respecto a los encontrados en esta investigación, lo cual es probable que se deba a cuestiones espaciales y temporales en cada estudio.

La reducción del consumo de agua por sector consumidor y por municipio, prácticamente obedece a un incremento en el precio del agua. Por ejemplo, en el residencial osciló entre 0.2 y 0.6 %, en el comercial de 0 a 0.6 % y en el industrial de 0 a 0.4 %; y es por eso que el consumo en estos sectores casi permaneció constante ante una reducción del 10 % en la oferta de agua. Mientras que en el sector agrícola del municipio de Mexicali el precio subió de 0.20 a 0.24 MXN \$ m⁻³ (20 % comparado con el modelo base) y en SLRC el cambio fue de 0.18 a 0.22 MXN \$ m⁻³ (22 % respecto al modelo base).

Cuadro 2. Asignación del agua entre consumidores y aumento en el precio ante escasez del recurso.

Municipio	R ^r	C ^q	I ^s	F ^p	G ^z	R ^r	C ^q	I ^s	F ^p	G ^z
	Millones de m ³					MXN \$ m ⁻³				
	Consumo modelo base					Precio modelo base				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.84	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	584.6	5.7	7.15	51.16	59.82	0.20	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.8	0.0	8.28	6.68	9.71	0.18	0.19
Total	197.3	21.7	16.7	755.4	5.7					
	Disminución de la disponibilidad en 10 %									
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.57	80.09	83.82		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.95	66.94	64.55		
Ensenada	9.0					14.19				
Mexicali	63.3	4.2	4.7	569.2	5.6	7.19	51.20	59.86	0.24	0.23
SLRC	24.5	2.0	0.7	166.3	0.0	8.32	6.72	9.75	0.22	0.23
Total	197.1	21.7	16.7	735.5	5.6					
	Diferencia respecto al escenario base									
Tijuana	0	0	0			0.04	0.04	0.04		
Tecate	0	0	0			0.04	0.10	0.04		
Ensenada	0					0.04				
Mexicali	-0.1	0	0	-15.4	-0.1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
SLRC	0	0	0	-4.5	0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Total	-0.2	0	0	-19.9	-0.1					
	Diferencia % respecto al escenario base									
Tijuana	0.0	0.0	0.0			0.2	0.0	0.0		
Tecate	-0.1	0.0	0.0			0.3	0.1	0.1		
Ensenada	-0.1					0.3				
Mexicali	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4	0.6	0.1	0.1	20.0	21.0
SLRC	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4	0.5	0.6	0.4	22.0	21.1
Total	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4					

R^r: sector residencial; C^q: sector comercial; I^s: sector industrial; F^p: sector agrícola; G^z: sector pecuario. MXN \$: pesos mexicanos.

Con tendencia similar, para el sector pecuario de Mexicali y SLRC el precio aumentó de 0.19 a 0.23 MXN \$ m⁻³, 21 % de incremento respecto al modelo base (Cuadro 2). Los resultados encontrados indican que, ante una reducción en la oferta de agua, los sectores agrícola y pecuario serían los más afectados tanto en consumo como en precio, pues el consumo disminuiría en mayor proporción que en el resto de los sectores analizados a causa de un incremento en el precio del agua.

El PIB del estado de Baja California en 2019 fue de 575.8 mil millones MXN \$, valor relativamente constante desde 2013, de los cuales las actividades primarias, secundarias

y terciarias aportaron 15.5, 221.2 y 339.1 mil millones MXN \$, respectivamente (INEGI, 2021d). De acuerdo con el consumo de agua, el sector primario es el que más agua utiliza, pero es el que menos aporta al PIB de la entidad. Los otros sectores no agrícolas consumen menos agua, pero tienen mayor participación en el PIB; en consecuencia, en una situación de escasez o reducción de agua de los acuíferos, el agua extraída se asignaría en aquellos sectores con mayor valor de uso del agua (Ghosh *et al.*, 2017).

En el caso de los municipios de Baja California es posible que haya una transferencia de agua del municipio de Mexicali con vocación agrícola hacia Tijuana por el dinamismo en actividades del sector comercial, industrial y residencial, lo cual coincide con lo planteado por Scott *et al.* (2012), que al no existir fuentes adicionales de suministro de agua en lugares donde la demanda de agua tiene un comportamiento creciente, puede darse la reasignación de agua de la agricultura hacia otros sectores consumidores. La reasignación de agua entre sectores puede beneficiar algunos y perjudicar a otros (Elbakidze *et al.*, 2018). En los municipios analizados, el beneficiado podría ser Tijuana y el perjudicado sería Mexicali y SLRC. Para evitar esta situación se recomendaría considerar regulaciones y restricciones para transferir el agua de un sector a otro, además de realizar un estudio que determine el consumo óptimo de agua en el sector agrícola de Mexicali que defina el límite de la transferencia de agua hacia los sectores residencial, comercial e industrial de Tijuana. Al respecto, resulta evidente que se requiere más investigación.

La disminución de la sobreexplotación de los acuíferos y las aguas subterráneas es deseable, para evitar problemas como los mencionados y evitar poner en riesgo el crecimiento de los sectores económicos que sostienen a un estado o país. Con base en el modelo, la disminución de la demanda de agua en los sectores con mayor consumo como el agrícola y pecuario en los municipios de Mexicali y SLRC es un camino viable, dado que dichos municipios son los que más agua consumen y los que menos aportan al PIB. Además, esos sectores pagan un precio muy bajo por el agua, y precisamente por ello es factible aumentar el precio en 20 y 22 %, respectivamente, pudiendo incluso ser mayor a este porcentaje. Por ejemplo, si el precio aumentara 100 %, la demanda de agua en el sector agrícola se reduciría en más del 10 %, esto es deseable considerando la sobreexplotación de los acuíferos.

Los resultados de este estudio son similares a los encontrados por otros autores para el caso de México. García-Salazar *et al.* (2006) indicaron que se requiere un aumento en el precio del agua en el sector agrícola de 98.6 % para disminuir en 10 % su extracción en la Comarca Lagunera. Esos autores señalaron que tal aumento en el precio podría lograrse eliminando o reduciendo los subsidios que tienen en este sector, por ejemplo, aumentando el precio de la energía eléctrica, el principal insumo para bombear agua. El aumento en el precio fomentaría el ahorro de agua por parte de los agricultores, ya que introducirían tecnologías en los cultivos y en los sistemas de riego, como el riego por goteo subsuperficial. Por lo tanto, en la región de estudio es posible aumentar el precio para reducir la demanda de agua en el sector agrícola.

Ramírez *et al.* (2019) indicaron que en muchos de los distritos de riego en México el agua no se cobra por volumen sino por hectárea; señalaron que los agricultores pagan

una tarifa que no refleja el precio real del agua. En consecuencia, se hace un uso ineficiente del recurso hídrico. Estos autores concluyeron que se debe cobrar una tarifa más elevada respecto a la actual, para promover un uso eficiente del agua. García-Salazar *et al.* (2006), Ramírez *et al.* (2019), y los resultados de este estudio coincidieron en que se debe aumentar el precio del agua en el sector agrícola para disminuir de manera significativa las extracciones de agua provenientes de los acuíferos.

Esta recomendación deberá tomar en cuenta la inelasticidad que caracteriza a la demanda de agua al responder a cambios en el precio. La demanda de agua en todos los sectores es inelástica debido a que no existen bienes sustitutos, y el valor de la elasticidad precio de la demanda en los diferentes sectores dependerá de la posibilidad de reducir el consumo de agua cuando el precio cambia. Los resultados de esta investigación indican que ante una disminución en la disponibilidad de agua el consumo deberá disminuir en la agricultura, sector donde el valor del recurso es menor. Como ya fue señalado, técnicamente sí es posible lograr una disminución de la demanda de agua en este sector. La disminución de la demanda tendrá efectos positivos sobre la región. El menor consumo de agua disminuirá la presión sobre los recursos hídricos de la región y no será un obstáculo para el desarrollo económico de la región.

Por el contrario, mantener tarifas bajas del agua en el sector agropecuario de los municipios de Mexicali y SLRC incentiva un uso irracional e ineficiente del agua, lo cual podría perjudicar el desarrollo de otros sectores como el agua residencial y los usos comercial e industrial de otros municipios del estado de Baja California, en especial al municipio de Tijuana. El precio se vuelve un instrumento importante en regiones con escasez de agua, como algunas ciudades del norte de Baja California que carecen de fuentes locales de abastecimiento. Las tarifas bajas del agua pueden estar relacionadas con un consumo alto que origina presión sobre los recursos hídricos y suelen crear situaciones críticas de abastecimiento de agua en periodos de escasez.

Además de usar la tarifa del agua como medida para hacer un uso eficiente del recurso, se podrían implementar otras medidas adicionales en algunos sectores. Por ejemplo, en el sector agrícola de Mexicali y SLRC, además de introducir nuevas tecnologías en el riego de los cultivos, se podría utilizar agua tratada que podrían provenir de los otros municipios. Los sectores comercial e industrial podrían reutilizar agua si implementan su tratamiento. En el sector residencial se podría incidir a través de tecnología ahorradora de agua en regaderas, inodoros y lavabos y cambiando hábitos de consumo, tales como bañarse en menos tiempo o reutilizar el agua de las lavadoras, entre otros.

CONCLUSIONES

El análisis de una reducción en la oferta de agua indicó que, si disminuye el consumo y se aumenta el precio a los sectores consumidores, el sector agrícola y pecuario de los municipios de Mexicali y San Luis Río Colorado pueden ser los más afectados, debido a que el sector agropecuario tiene menor valor del precio en el uso del agua.

Con base en la sobreexplotación de los acuíferos de la región y los precios bajos que pagan los diferentes usuarios del agua en Mexicali y San Luis Río Colorado, la reco-

mendación sería usar el precio del agua como mecanismo para disminuir la demanda de uso y con ello lograr la disminución del agua extraída.

Si se considera la reasignación y el valor de uso del agua entre los sectores consumidores, una disminución en la oferta de dicho recurso generaría beneficio para los sectores residencial, comercial e industrial de Tijuana, pero perjudicaría al sector agropecuario de Mexicali y San Luis Río Colorado. Por tal razón, es recomendable que los tomadores de decisiones en materia de agua consideren alguna regulación o restricción al respecto, en especial para no perjudicar al sector agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado a Fidel Bautista Mayorga para los estudios de Doctorado en ciencias.

REFERENCIAS

- Atucha AJ, Gualdoni P. 2018. El funcionamiento de los mercados. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. <http://nulan.mdp.edu.ar/2879/1/atucha-et-al-2018.pdf> (Retrieved: June 2022).
- Castro R JC, Cruz G FV, Magaña Z JD, Martínez A G, Reyes M A, Sainz Z RO. 2017. La demanda del agua y su asignación eficiente en la agricultura: un caso en Guanajuato, México. *Economía Coyuntural* 2 (2): 145–180. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2415-06222017000200005&lng=es&tlng=es (Retrieved: May 2021).
- CEABC (Comisión Estatal del Agua de Baja California). 2017. Informe mensual diciembre 2017. [http://www.cea.gob.mx/documents/indicadores/CIERRE %20DE %20INDICADORES %202017.pdf](http://www.cea.gob.mx/documents/indicadores/CIERRE%20DE%20INDICADORES%202017.pdf) (Retrieved: June 2021).
- CEABC (Comisión Estatal del Agua de Baja California). 2018. Programa hídrico del Estado de Baja California. [http://www.cea.gob.mx/phebc/resejec/RESUMEN %20EJECUTIVO %20PHEBC.pdf](http://www.cea.gob.mx/phebc/resejec/RESUMEN%20EJECUTIVO%20PHEBC.pdf) (Retrieved: March 2021).
- CEABC (Comisión Estatal del Agua de Baja California). 2021. Indicadores OOA. <http://www.cea.gob.mx/indicadores.html> (Retrieved: May 2022).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Estadísticas del agua en México. Edición 2018. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf (Retrieved: January 2021).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2019. Acuíferos por región hidrológico-administrativa. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuíferos&ver=reporte> (Retrieved: January 2021).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2020. Disponibilidad por acuíferos. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html (Retrieved: February 2021).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2021. Recaudación de la CONAGUA. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=recaudacion&ver=mapa&o=0&n=nacional> (Retrieved: August 2021).
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2018. Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas 2016–2050. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050> (Retrieved: February 2021).
- CONASAMI (Comisión Nacional de los Salarios Mínimos). 2021. Tabla de Salarios Mínimos Generales y Profesionales por Áreas Geográficas. <https://www.gob.mx/conasami/documentos/tabla-de-salarios-minimos-generales-y-profesionales-por-areas-geograficas?idiom=es> (Retrieved: March 2021).
- Cota-Verdugo LF, Beltrán-Morales A, Troyo-Diéguez E, García-Hernández JL, Beltrán-Morales LF, Hernández-Trejo VA, Ortega-Rubio A, Navarro BA. 2013. Mercado de derechos de agua para uso agrícola en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4 (1): 63–75. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000100005 (Retrieved: March 2021).
- Elbakidze L, Vinson H, Cobourn K, Taylor RG. 2018. Efficient groundwater allocation and binding hydrologic externalities. *Resource and Energy Economics* 53: 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2018.05.002>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia: opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/captacion_agua_de_lluvia.pdf (Retrieved: July 2021).

- García-Salazar JA, Guzmán-Soria E, Fortis-Hernández M. 2006. Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia* 40 (2): 269–276. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/461> (Retrieved: September 2021).
- Ghosh S, Ibararán ME, Willett KD, Sanchez T EG. 2017. Water allocation and management along the Santa Cruz border region. *Water Resources and Economics* 19: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2017.09.004>
- Gómez-Ugalde SG, Mora-Flores JS, García-Salazar JA, Valdivia-Alcalá R. 2012. Demanda de agua para uso residencial y comercial. *Terra Latinoamericana* 30 (4): 337–342. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1089/1335> (Retrieved: March 2021).
- Guzmán-Soria E, García-Salazar JA, Mora-Flores JS, Fortis-Hernández M, Valdivia-Alcalá R, Portillo-Vázquez M. 2006. La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia* 40 (6): 793–804. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/510> (Retrieved: September 2021).
- Guzmán-Soria E, Hernández-Martínez J, García-Salazar JA, Rebollar-Rebollar S, de la Garza-Carranza MT, Hernández-Soto D. 2009. Consumo de agua subterránea en Guanajuato, México. *Agrociencia* 43 (7): 749–761. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/759> (Retrieved: October 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021a. Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), Población de 15 y más años de edad. <https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/default.html#Tabulados> (Retrieved: February 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021b. México en cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=02> (Retrieved: June 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021c. Censos económicos 2019. https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Datos_abiertos (Retrieved: June 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021d. Publicaciones. <https://www.inegi.org.mx/app/publicaciones/> (Retrieved: August 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021e. Banco de Información Económica (BIE). <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0#divFV472180> (Retrieved: August 2021).
- Kawaguchi T, Suzuki N, Kaisier HM. 1997. A Spatial Equilibrium Model for Imperfectly Competitive Milk Markets. *American Journal of Agricultural Economics* 79: 851–859. <https://doi.org/10.2307/1244426>
- Mayta A, Durán A. 2015. Sobre-explotación de aguas subterráneas en Punata: causas y efectos. Reporte de investigación. <https://docplayer.es/57974867-Sobre-explotacion-de-aguas-subterranas-en-punata-causas-y-efectos.html> (Retrieved: January 2021).
- Miranda-Trejo M, Ocampo-Fletes I, Escobedo-Castillo JF, Hernández-Rodríguez ML. 2015. La distribución del agua potable en Tepexi de Rodríguez, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 12 (3): 261–277. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=51870-54722015000300001&script=sci_abstract (Retrieved: May 2021).
- Palacios-Vélez OL, Escobar-Villagrán BS. 2016. La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7 (2): 5–16. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353545556001> (Retrieved: February 2021).
- Ramírez B BA, González E A, Valdivia A R, Salas G JM, García S JA. 2019. Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 539–550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Romano G, Salvati N, Guerrini A. 2016. An empirical analysis of the determinants of water demand in Italy. *Journal of Cleaner Production* 130: 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.141>
- Scott CA, Megdal S, Oroz LA, Callegary J, Vandervoet P. 2012. Effects of climate change and population growth on the transboundary Santa Cruz aquifer. *Climate Research* 51: 151–170. <https://doi.org/10.3354/cr01061>
- SIACON-SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta-Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera). 2020. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430> (Retrieved: July 2021).
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2021. Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> (Retrieved: August 2021).
- Torres-Sombra J, García-Salazar JA, García-Mata R, Matus-Gardea J, González-Estrada E, Pérez-Zamorano A. 2013. Respuesta de la demanda de agua a cambios en el precio: un estudio por tipo de consumidor en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 47 (3): 293–307. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1020> (Retrieved: March 2021).
- Torres-Sombra J, García-Salazar JA. 2015. Uso del agua en el norte de Sinaloa: ¿a cuál consumidor asignar el recurso? *Tecnología y Ciencias del Agua* 6 (1): 167–173. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353539900010> (Retrieved: June 2021).

Anexo I

Con base en la teoría económica (Atucha y Gualdoni, 2018) y en evidencia empírica (Gómez-Ugalde *et al.*, 2012; Torres-Sombra *et al.*, 2013; Romano *et al.*, 2016), se formularon los siguientes modelos de regresión lineal múltiple para estimar las elasticidades precio de la demanda en los sectores residencial, comercial e industrial en el municipio de Tijuana:

Para uso residencial:

$$CPAR_t = f(PAR_t, PEER_t, INGR_t, CPAR_{t-1}, TEM_t, PP_t) \quad (11)$$

donde $CPAR_t$ es el consumo per cápita de agua de uso residencial; PAR_t es la tarifa real del agua para uso residencial; $PEER_t$ es la tarifa real de la energía eléctrica para uso residencial; $INGR_t$ es el ingreso real (se utilizó el salario mínimo general como variable aproximada al ingreso); $CPAR_{t-1}$ es el consumo per capita por agua de uso residencial con un periodo de rezago; TEM_t es la temperatura promedio; PP_t es la precipitación pluvial promedio.

Para el sector comercial:

$$CPAC_t = f(PAC_t, CPAR_{t-1}) \quad (12)$$

donde $CPAC_t$ es el consumo per cápita de agua de uso comercial; PAC_t es la tarifa real del agua de uso comercial; $CPAC_{t-1}$ es el consumo per cápita de agua de uso comercial con un periodo de rezago.

Para el sector industrial:

$$CPAI_t = f(PAI_t, PEEI_t, PIBAS_t) \quad (13)$$

donde $CPAI_t$ es el consumo per cápita de agua de uso industrial; PAI_t es la tarifa real del agua de uso industrial; $PEEI_t$ es la tarifa real de la energía eléctrica de uso industrial; $PIBAS_t$ es el producto interno bruto real de las actividades secundarias del estado de Baja California.

Las funciones de regresión consideraron variables explicativas que resultaron más significativas ($p \leq 0.05$). La elasticidad precio de la demanda de agua en el sector residencial, comercial e industrial del municipio de Tijuana, surgieron de los parámetros estimados y el valor medio de la tarifa del agua por tipo de uso. Las funciones de demanda usadas en el modelo de programación a nivel de municipio se obtuvieron usando las elasticidades precio de la demanda, en conjunto con las tarifas y las canti-

dades de la demanda. Con base en Kawaguchi *et al.* (1997), la pendiente y el intercepto se obtuvieron de la manera siguiente:

$$Y_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_{ij} P_{ij} \quad (14)$$

La Ecuación 14 es la función de la demanda por sector consumidor de agua (*i*) y municipio (*j*).

$$\beta_{ij} = \varepsilon_{ij}^{pd} \frac{Y_{ij}}{P_{ij}} \quad (15)$$

La Ecuación 15 se usó para estimar la pendiente de la función de la demanda, donde β_{ij} es la pendiente de la demanda por sector consumidor *i* (residencial, comercial, industrial, agrícola y pecuario) y municipio *j* (Tijuana, Tecate, Ensenada, Mexicali y SLRC); ε_{ij}^{pd} es la elasticidad precio por sector consumidor y por municipio; Y_{ij} es la cantidad consumida de agua por sector consumidor y por municipio; P_{ij} es el precio o tarifa del agua por sector consumidor y por municipio.

$$\alpha_{ij} = Y_{ij} - \beta_{ij} P_{ij} \quad (16)$$

La Ecuación 16 se utilizó para estimar el intercepto de la función de la demanda, y se obtuvo a partir de los valores de la pendiente, la cantidad en demanda y el precio al consumidor.

$$P_{ij} = \frac{-\alpha_{ij}}{\beta_{ij}} + \frac{1}{\beta_{ij}} Y_{ij} = \lambda_{ij} + w_{ij} y_{ij} \quad (17)$$

La Ecuación 17 representa la función inversa de la función de demanda, y se obtuvo despejando el precio de la Ecuación 14.

$$AUDC = \lambda_{ij} y_{ij} + \frac{1}{2} w_{ij} y_{ij}^2 \quad (18)$$

La Ecuación 18 se utilizó para estimar el área bajo la curva de la demanda (ABD), misma que aparece en la función objetivo del modelo; se obtuvo a través de la integral de la Ecuación 14.

SALINITY OF SOIL AND IRRIGATION WATER ON RICE PRODUCTIVITY IN THE CANTON OF SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR

Reina Concepción Medina-Litardo¹, Sady Javier García-Bendezú², Manuel Danilo Carrillo-Zenteno³, Iris Perez-Almeida*, Edwin Hasang-Moran⁵

¹ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Agrarias. Guayaquil, Ecuador.

² Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Agronomía. La Molina, Perú.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Pichilingue, Ecuador.

⁴ Universidad Ecotec. Centro de Estudios para el Desarrollo Sostenible. Samborondon, Ecuador.

⁵ Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Babahoyo, Ecuador.

* Author for correspondence: iperez@ecotec.edu.ec

ABSTRACT

The surface of agricultural soils affected with salinity causes degradation and reduction of crop production, negatively impacting the economy of farmers. The objective of this research was to determine the effect of water quality and soil salinity on rice production in the sub-basin of the Yaguachi River, Ecuador. For this purpose, 99 soil samples were georeferenced and analysed over an area of 19 027 ha, as well as water samples representative of the area under study. Soil pH and electrical conductivity (EC) maps were produced and a regression analysis between EC and rice yield was performed on 34 producer plots. The predominant texture of the soils was found to be clayey, with an average pH of 6.73; The 38.4 % of the samples had an EC between 3.8 and 7.1 dS m⁻¹. Rice yield gradually decreased as it was grown in soils with higher salinity and 26.81 % of the yield loss was found to be attributed to the increase in EC. The salinity of the irrigation water and other quality indicators such as the percentage of soluble sodium (Na⁺) and the sodium adsorption ratio (RAS) classified the water as severely restricted for use. However, given that crop yields did not show as drastic a reduction as expected, it can be said that the rice plant responds to the conditions of the canton of San Jacinto de Yaguachi as moderately tolerant to salinity.

Keywords: electrical conductivity, Ecuador, sodium adsorption ratio - RAS, regression, Yaguachi.

INTRODUCTION

Soil salinity is one of the problems that most affects agroecosystems worldwide. Soil origin, use of saline irrigation water and excessive fertilization are described as the main causes of salinization (FAO, 2015). In Ecuador, the formation of saline soils has been reported by Pozo *et al.* (2010), especially in the flat areas of the coastal slope, with Guayas being the most affected province (INIAP, 2014).

Rice is sensitive to salinity, especially in the plantlet stages, end of the vegetative phase and initiation of the panicle until flowering (Munns and Tester, 2008). The plant is

Citation: Medina-Litardo RC, García-Bendezú SJ, Carrillo-Zenteno MD, Perez-Almeida I, Hasang-Moran E. 2022. Salinity of soil and irrigation water on rice productivity in the canton of San Jacinto de Yaguachi, Ecuador. *Agrociencia*. 56(7): 1404-1430. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2602>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: April 14, 2022.

Approved: July 05, 2022.

Published in Agrociencia:
December 05, 2022.

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



relatively tolerant during germination, as well as throughout the grain filling and ripening stages. Salinity delays spiking and flowering, which increases ear sterility, reduces weight and total carbohydrate content in the grain, and in the end decreases yield. Soil EC values above 3.8 dS m^{-1} can generate yield losses greater than 25 % (Willadino and Rangel, 2010).

In the San Jacinto de Yaguachi canton, Guayas province, Ecuador, 3000 ha of rice are cultivated under flooding. This surface is irrigated during the dry season (June to December) with water from the Yaguachi River. Its saline waters, due to the tides, extend towards the interior of the continent, up to 100 km through its tributaries; there is intrusion of saline water into the study area (Medina *et al.*, 2022).

The objective of this study was to determine the degree of salinity affectation on soils and the effect of irrigation water in the San Jacinto de Yaguachi canton, as well as the effect of salinity levels on the yield of rice production systems.

MATERIALS AND METHODS

The research was conducted in the San Jacinto de Yaguachi canton, Guayas province, Ecuador, between $2^{\circ} 5' 15'' - 2^{\circ} 6' 14'' \text{ N}$ and $79^{\circ} 40' 51'' - 79^{\circ} 42' 03'' \text{ W}$. The San Jacinto de Yaguachi canton has a tropical savanna climate (Aw) according to the Köppen climate classification. According to the records of the National Institute of Meteorology and Hydrology (Ecuador; INAMHI, 2021), precipitation is markedly seasonal, with an annual average of 1250 mm concentrated almost entirely in the months of January through May, and the average monthly temperature varies between 24.0 and 27.2 °C. The soils are classified as vertisols, characterized by a high content of expansive clay 2:1; they are poorly drained and when they are dry, wide and deep cracks are formed (Gardi *et al.*, 2014).

Soil and water sampling

Soil sampling was conducted in September 2018, a period without rainfall. The study area comprised 19 027 ha located on both banks of the Yaguachi River, where 99 agricultural plots were randomly selected. Sampling points within the study area are highlighted (Figure 1A).

Composite soil samples (15 subsamples) were taken in the 0–20 cm depth of each plot. For water sampling, five sites were selected distributed among the irrigation channels within the study area. Composite samples were taken in the center of each irrigation channel, 10 cm below the surface using polyethylene bottles. Samples were kept refrigerated at 4 °C until analysis. Both soil and water sampling points were georeferenced using a GPS.

Soil and water analysis

Soil and water analyses were performed at the Chemical Laboratory of the Sugarcane Research Center of Ecuador (CINCAE). Physical and chemical properties of the soil were determined, texture, EC and pH in the saturated mix.

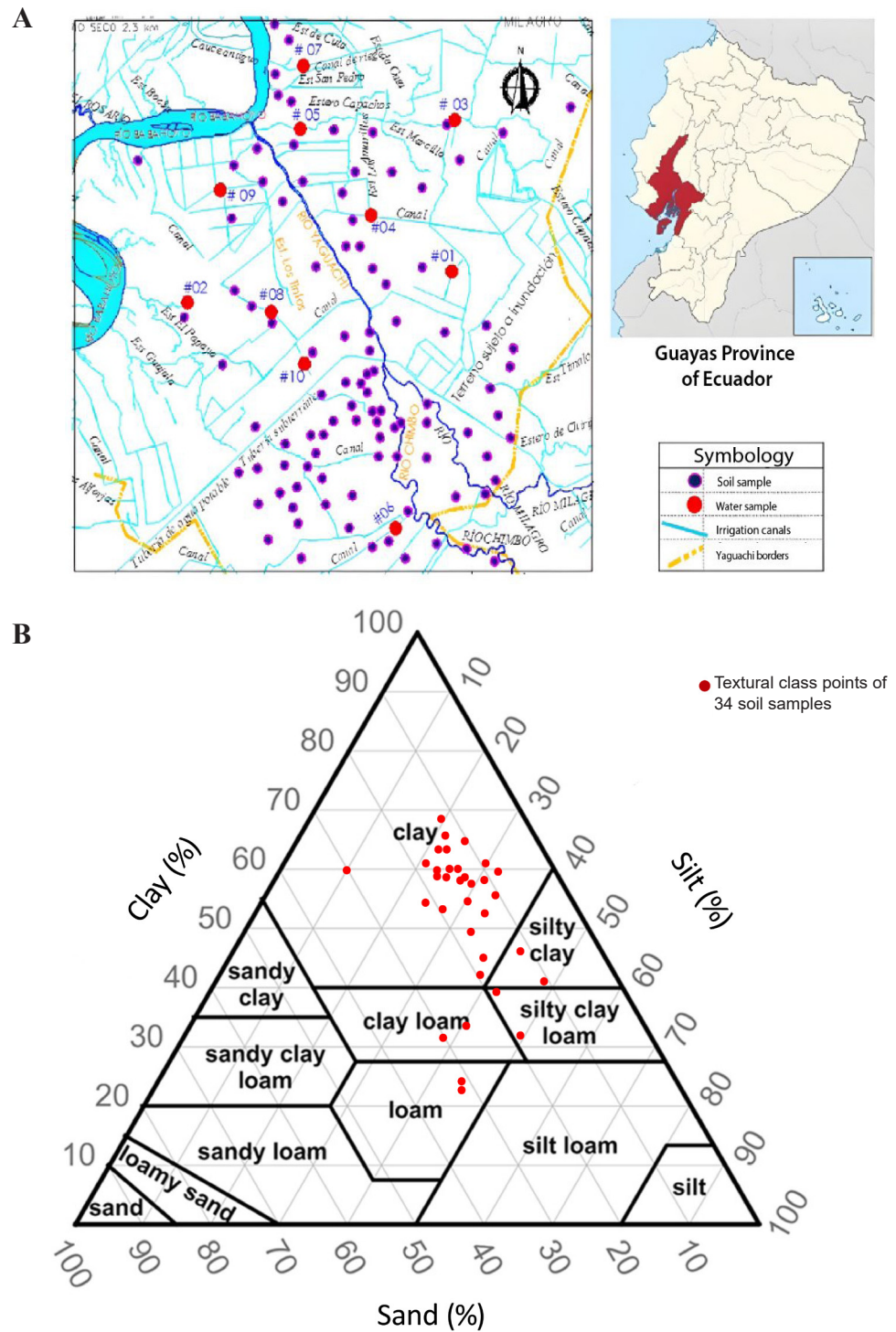


Figure 1. Samples from the canton of San Jacinto de Yaguachi, Guayas province, Ecuador. A. Location of soil and water sampling sites (blue and red dots, respectively). B. Location of soils within the textural triangle.

In the water samples, pH, EC, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, bicarbonate, chloride and sulphate contents were determined. Furthermore, the original and adjusted RAS (RASaj) were calculated using the following formula (concentrations in meq·L⁻¹):

$$\text{RAS} = \text{Na} / [(\text{Ca} + \text{Mg}) / 2]^{1/2}$$

For the RASaj, the Ca concentration was replaced by the concentration expected to remain in the soil solution after reaching equilibrium conditions, according to the procedure described by Bower (1968). Additionally, the percentage of soluble sodium (PSS) in water was calculated according to Doneen's formula: PSS = 100 * Na⁺ / (Na⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺).

Soluble salts were composed based on the composition of the soluble ions and to estimate the precision of the chemical analysis of the water, the ionic equilibrium error equation was used, according to Matthes (1980): e = 100* (sc - sa)/(sc + sa), where e: percentage error, sc: sum of cations and sa: sum of anions (both in meq L⁻¹).

On the other hand, information was available from the farmers regarding the yields obtained in their rice plots. Within the 99 sampling points, 34 farms were found where accurate data on average rice yields were available. With this information, an exponential regression analysis between soil EC and crop yield was performed to express the trend of decreasing yields.

Elaboration of pH and EC maps

The geographic coordinates of each of the 99 sampling points and their corresponding pH and EC values were placed in an Excel table, which was added to the geographic information system (GIS). Interpolation was performed and the corresponding pH and EC isolines were plotted. Subsequently, the map of expected yield as a function of soil EC was elaborated using the reference values of Willadino and Rangel (2010). Regression analysis was performed using Costat (Cohort) version 6.4; whereas, ion concentrations were analysed with statistical descriptive techniques as measures of central tendency and dispersion in Minitab® version 19.

RESULTS AND DISCUSSION

Soil

Out of 34 rice plots, 76.5 % of the soil studied is of clay textural class, followed by 5.9 % as loam, clay loam, silty clay loam and silty clay (Figure 1B). With over 35 % plastic and sticky clay and 50 % of the expansive clay fraction (2:1) of montmorillonite type, the soils were classified as vertisols (the vast majority of soils had high to very high clay contents). Heavy soils, such as clay soils, usually have higher fertility and water retention capacity than light soils and their main limitation for crop growth is their low oxygen circulation. Since rice has the tissue known as aerenchyma, which can provide oxygen to the roots under flooding conditions, it is an ideal crop for this type of soils, particularly when the flood irrigation system is used. In this regard, Dou *et*

al. (2016) mentioned that on clay soils rice significantly increased its grain yield and biomass accumulation compared to those grown on loam or sandy soils.

pH and EC

The pH found had a mean of 6.73 within a range from 5.90 to 7.55; it was observed that 5766 ha (30.33 %) are slightly acid soils, while 66.67 %, corresponding to 13 261 ha, showed practically neutral pH from 6.5 to 7.5 (Figure 2A). It can be considered normal that the soils in the rice plots in the canton of San Jacinto de Yaguachi have pH values close to neutrality as a consequence of flood irrigation using water with pH close to 7, as may be seen below. The optimal pH for rice is 6.6, because at this value the microbial release of nitrogen (N) and phosphorus (P) from organic matter is high, while metals such as aluminum (Al), manganese (Mn) and iron (Fe) are below the toxic level. Outside this range, unfavorable conditions for plant growth are generated; since at low pH there are Ca and Mg deficiencies and high Al contents, as well as high P fixation, while at high pH there may be insufficiency of soluble micronutrients (Neina, 2019).

Regarding EC, 24.24 % of the samples (4612 ha) presented a value of 3.8 to 5.1 dS m⁻¹, and 14.14 % (2690 ha) ranged from 5.1 to 7.2 dS m⁻¹. According to Willadino and Rangel (2010), with the aforementioned salinity ranges, rice production would decrease by 25 and 50 %, respectively (Figure 2B).

Rice yield gradually decreased as it was grown in soils with higher salinity following an exponential trend (Figure 3) and it was found that 30.15 % of the yield loss could be attributed to the increase in EC. In other words, almost one third of the yield decrease is caused by soil salinity. Although this degree of association between yield and salinity is apparently not very high, at least two considerations must be accounted for. The first is that the association between the two variables was highly significant ($p \leq 0.01$), this is that the association between them really exists. Second, there are other factors involved in the process that were pointed out by the different producers, such as differences in crop management, use or not of certified seed, intensive or scarce pest and disease control, among others. Additionally, other improper cultural practices such as inadequate fertilization, low or no incorporation of organic matter, excessive applications of nitrogen fertilizers, failure to perform soil analysis, and inadequate weed control may also have an impact. Nevertheless, the regression line in the figure shows that plants maintained a yield close to 2.5 Mg ha⁻¹ at an EC higher than 12 dS m⁻¹.

The rice plant is highly tolerant to waterlogging, which may favour its performance in the saline soils of the study because flood irrigation, where standing water is maintained, can produce salinity reduction in the root zone by washing and dilution of salts (FAO, 2015). The above observations suggest that the rice plant behaves as moderately tolerant to salinity in the conditions of the canton of San Jacinto de Yaguachi.

Giao (2021) found a reduction of up to 30 % in the average yield of different rice varieties when soil salinity reached a value of 3.87 % (approximately 6 dS m⁻¹) due to

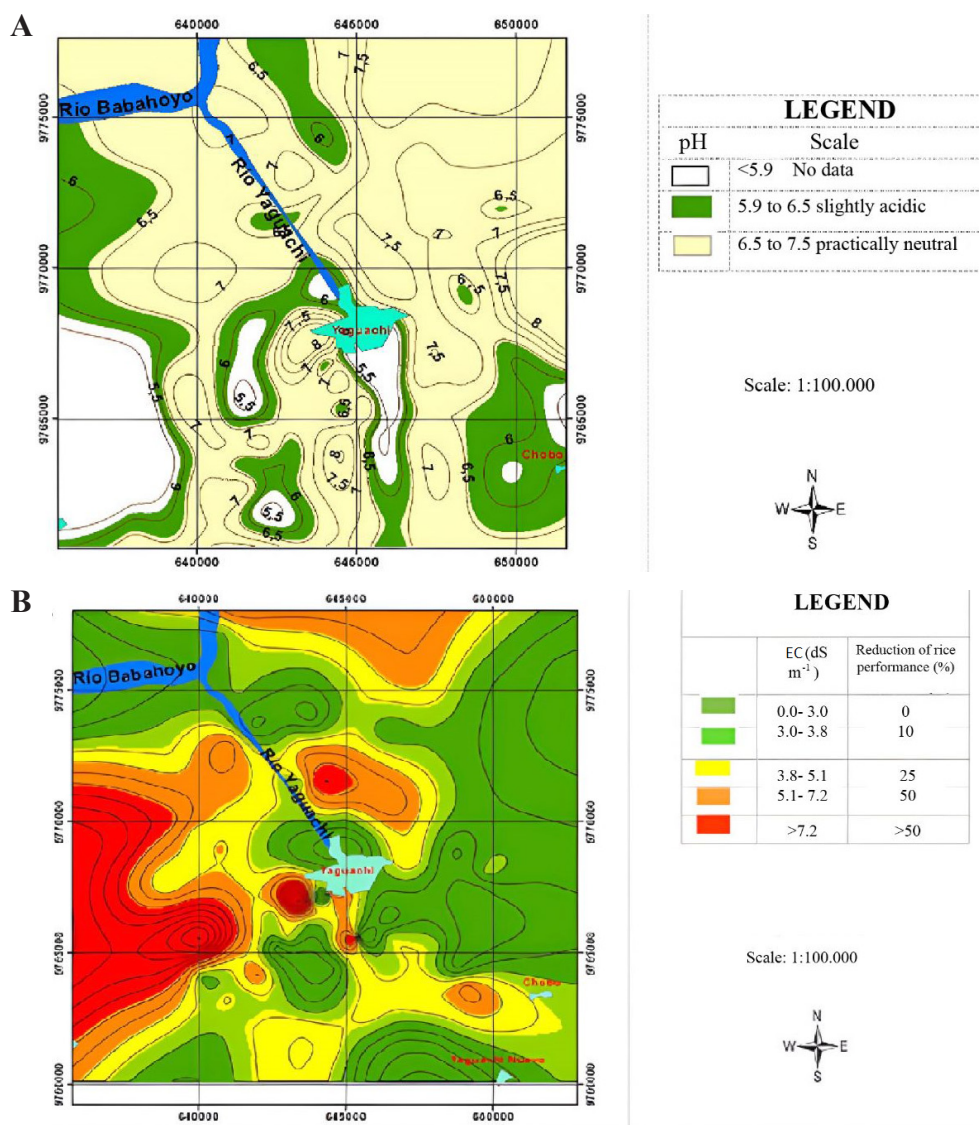


Figure 2. Distribution of soil chemical characteristics in the farms within the study area in the canton of San Jacinto de Yaguachi, Guayas province, Ecuador (n = 99 samples). A. pH. B. Electrical conductivity (EC) and estimated rice yield reduction (according to Willadino and Rangel, 2010).

saline intrusion, indicating that in that study there were moderately acceptable yields despite the high salinity value. In contrast, Lan (2021) detected in variety H78 a yield reduction of 58.6 % when the EC of the medium reached approximately 4.7 dS m⁻¹ and no yield when the EC approached 8 dS m⁻¹.

This indicates that there are different salinity tolerance indices associated with varietal differences in rice plants, as stated by Cristo-Valdés *et al.* (2018). Differences in yield attributed to salt stress are mainly observed in the number of panicles and stems per plant (Khanam *et al.*, 2018). Rodriguez *et al.* (2019) mentioned that the mechanisms that

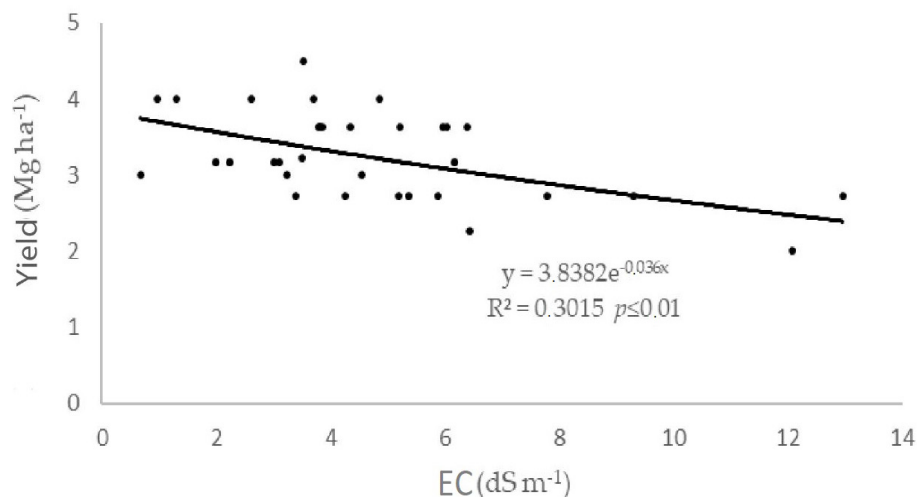


Figure 3. Exponential regression analysis between irrigation water EC and rice yield in 34 farms in the study area in the canton of San Jacinto de Yaguachi, Guayas province, Ecuador.

explain the differences in the response to salt stress in rice varieties are associated with differences in their osmotic adjustment capacity.

In a recent review, Chen *et al.* (2021) summarized information on the major molecular mechanisms underlying salinity tolerance in rice and highlighted that numerous gene families and interaction networks are involved in regulating the response. In this regard, Pundir *et al.* (2021) recently identified quantitative trait loci (QTL) for salt stress tolerance in rice that may be advantageous in breeding programs for the development of salinity tolerant varieties at the reproductive stage.

Water

On the values of the chemical characteristics of irrigation water (Table 1), it was observed that in all samples the total concentration of negative ions (anions) exceeded that of positive ions (cations). Which suggests that perhaps some important cation, such as K⁺ or Fe⁺² (ferrous ion), was not included in the analysis; although it is known that these ions are usually found in low concentrations in natural waters. For this reason, when evaluating the precision of the water analysis based on its ionic balance, an analysis that complied with a balance error slightly higher than usual, but always within a range percentage restricted to one digit (this is, less than 10 %) was considered acceptable. The average error obtained was 7.15 % (Table 2).

The pH of the five samples showed values close to each other and ranged from 6.44 to 7.01, with an average of 6.77, which means classifying it practically as neutral water (Table 2). From this point of view, it does not pose problems to be used for irrigation according to the classification criteria from Ayers and Westcot (1994).

The EC of water did not present important variations, showing values between 2.32 and 2.84 dS m⁻¹, with a coefficient of variation of 7.47 % (Table 2). This indicates that

Table 1. Concentration of ions and soluble salts in rice irrigation water in the canton of San Jacinto de Yaguachi, Guayas province, Ecuador.

Sample	Ions (meq L ⁻¹)						Salts (meq L ⁻¹)					
	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	CaSO ₄	MgSO ₄	Na ₂ SO ₄	NaCl
1	20.85	2.76	6.22	19.45	2.43	10.72	2.43	0	0.33	6.22	4.17	16.68
2	22.39	1.25	4.79	20.13	1.27	9.92	1.25	0.02	0	4.77	5.15	17.75
3	19.25	2.48	5.61	19.04	2.08	12.21	2.08	0	0.4	5.61	6.6	12.65
4	21.12	2.86	6.18	20.40	2.44	12.36	2.44	0	0.42	6.18	6.18	20.4
5	19.55	1.09	4.28	18.64	1.76	9.41	1.09	0.67	0	4.28	5.13	18.64
Mean	20.63	2.09	5.42	19.53	2.00	10.92	1.86	0.14	0.23	5.41	5.45	17.22
Maximum	22.39	2.86	6.22	20.40	2.44	12.36	2.44	0.67	0.42	6.22	6.6	20.4
Minimum	19.25	1.09	4.28	18.64	1.27	9.41	1.09	0	0	4.28	4.17	12.65
SD	1.27	0.85	0.86	0.73	0.49	1.33	0.65	0.30	0.21	0.86	0.96	2.90
CV	6.16	40.78	15.86	3.76	24.74	12.16	26.52	44.41	50.62	13.87	14.54	14.20

Na⁺: sodium ion; Ca⁺²: calcium ion; Mg⁺²: magnesium ion; Cl⁻: chloride; HCO₃⁻: bicarbonate; SO₄⁻²: sulphate; Ca (HCO₃)₂: calcium bicarbonate; Mg (HCO₃)₂: magnesium bicarbonate; CaSO₄: calcium sulphate; MgSO₄: magnesium sulphate; Na₂SO₄: sodium sulphate; NaCl: sodium chloride.

Table 2. Water quality indicators in rice irrigation and estimation of the analytical error in the canton of San Jacinto de Yaguachi, Guayas province, Ecuador.

Sample	pH	EC (dS·m ⁻¹)	PSS	RAS	RASaj	Error (%)
1	6.91	2.49	69.90	9.84	19.09	4.44
2	6.44	2.84	78.75	12.88	17.78	4.84
3	6.78	2.53	70.41	9.57	18.19	9.87
4	6.7	2.63	70.03	9.93	19.87	7.71
5	7.01	2.32	78.45	11.93	23.03	8.93
Mean	6.77	2.56	73.51	10.83	19.59	7.15
Maximum	7.01	2.84	78.75	12.88	23.03	
Minimum	6.44	2.32	69.90	9.57	17.78	
SD	0.22	0.19	4.66	1.48	2.08	
CV	3.23	7.47	6.33	13.69	10.64	

EC: electrical conductivity, RAS and RASaj: original and adjusted sodium adsorption ratio, respectively.

water would present light to moderate use restriction if it is considered that it stays within the range 0.7 to 3.0 dS·m⁻¹ (Abdallah and Mourad, 2021). However, according to Salinity Laboratory Staff criteria (El-Aziz, 2017), the water was classified as of very high salinity that should be used in well-drained soils for crops with high-tolerance to salinity; which means it would not be recommended for the rice crop under study. Water EC, as an indicator of salinity risk, is the most important quality parameter for crop productivity. First above all, water with high salinity causes physical problems

due to high ionic concentration that results in a decrease of useful water for plants due to the reduction of their osmotic potential. Which means that even if the soil has high humidity, plants suffer water stress due to the difficulty of the roots to absorb water. Simultaneously or afterwards, chemical or toxic problems caused by specific ions such as chlorine or sodium may occur in the plant (Fipps, 2003).

The moderately high EC recorded in the water of the study area may reflect the enrichment by some salts as there is saline intrusion in the Yaguachi River as a result of tidal inflow, such as calcium sulphate, magnesium sulphate, sodium sulphate, and sodium chloride.

The RAS reached a mean of 10.83 (Table 2), a value that is considered a risk of toxicity to crops according to the criteria indicated by Ayers and Westcot (1994). The RAS value is a useful index for estimating the risk posed by the sodium level of water for both crops and soils.

The use of this water for irrigation purposes is not considered a high risk for the soil since it is used in many light soils, but in vertisols as those in the area under study, with more than 50 % of expansive clays (montmorillonite), the risk of affecting permeability due to the effect of sodium is magnified. In this case, according to the previous criterion, severe soil dispersion problems could exist when RAS values are reached, higher than nine.

Continued use of water with a high RAS values can lead to a deterioration of the physical structure of the soil, as Na⁺ binds to the clays, breaking up the soil aggregates, whose particles will clog the pores and make soils increasingly impermeable to water and air penetration (Fipps, 2003). However, in a research implemented with different rice varieties subjected to different salt concentrations and values of RAS in the growth medium, Bajwa (1982) found that salinity damage was less when there were high values of RAS in the irrigation water. Thus, he concluded that rice, although considered moderately sensitive to saline conditions, proved to be very tolerant to sodic conditions. This suggests that the level of damage caused by salinity in rice depends on a close interaction between EC and RAS in the growth medium.

The percentage of soluble sodium in the water samples was quite high and ranged from 69.90 to 78.75, with a mean value of 73.51 (Table 2). This is a high value as compared to the critical limits of Doneen (Loera-Alvarado *et al.*, 2019). In natural waters, sodium content is a common parameter to evaluate their suitability for irrigation purposes, since this element can affect soil permeability, as mentioned above. Excess sodium combined with carbonate ions leads to the formation of alkaline soils, while with chloride it participates in the formation of saline soils. Irrigation water containing large amounts of sodium is of particular concern not only because of the effect on the soil but also because of its possible toxic effect on the plant. The Wilcox plot (Peinado *et al.*, 2011) which relates the percentage of sodium and EC, indicates that all water samples were classified as inappropriate or of doubtful acceptance (Figure 4).

The concentration of the rest of the ions in the water indicates average values of Ca⁺² and Mg⁺² of 2.09 and 5.42 meq L⁻¹, respectively (Table 1). Thus, according to the

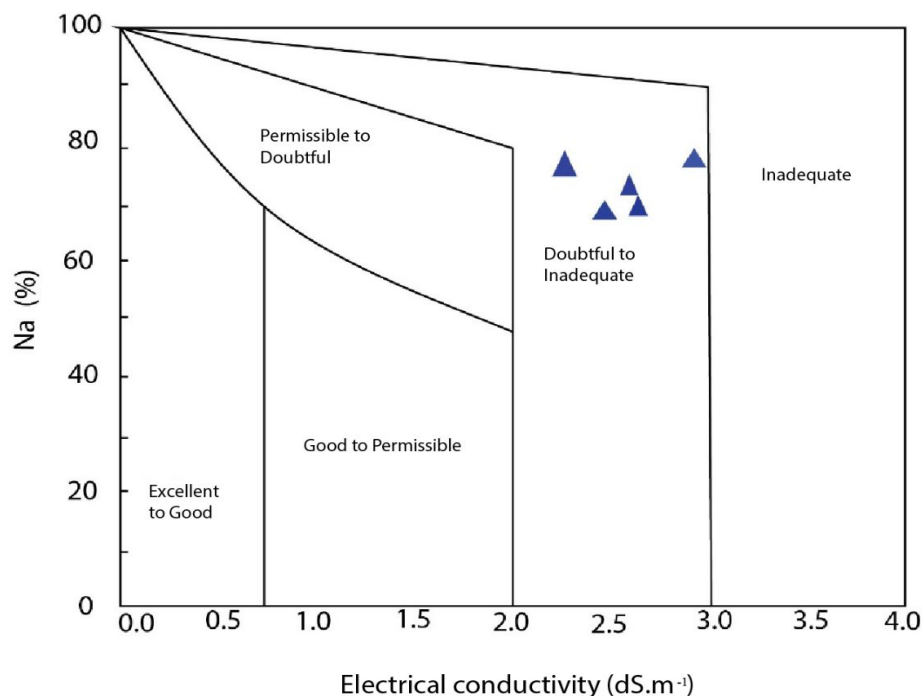


Figure 4. Wilcox nomogram with values of five irrigation water samples from the study area in the canton of San Jacinto de Yaguachi, Guayas province, Ecuador.

interpretation patterns of Monge (2018) for irrigation water, Ca would be at normal concentrations and Mg slightly high. Ca⁺² and Mg⁺² ions can help counteract the effects of Na⁺ and help maintain soil properties. On the other hand, excessive amounts of Ca⁺² can restrict the availability of phosphorus (P), boron (B) and iron (Fe) for plants (FAO, 2015).

The chloride anion showed an average value of 19.53 meq L⁻¹ (Table 1), which highlights the saline condition of the water. According to the Ayeseedlnirs and Westcot (1994) classification, concentrations above 10 meq L⁻¹ create severe irrigation water use restrictions for many crops, including rice.

The sulphate anion showed a mean concentration of 10.92 meq L⁻¹ (Table 1) which is considered acceptable. In very high amounts, its salts can affect sensitive crops by limiting Ca⁺² uptake and increasing Na⁺ and K⁺ uptake, leading to a disturbance of the cation balance within the plant.

For bicarbonates, in the water analysis, a mean value of 2.0 meq L⁻¹ was detected, with a minimum of 1.27 and a maximum of 2.44 meq L⁻¹ (Table 1). Although this ion is not normally toxic to the plant, it presents a mild to moderate degree of restriction for sprinkler irrigation, according to Ayers and Westcot (1994). This is due to the fact that when the water evaporates, a whitish precipitate of calcium bicarbonate remains on the leaves, which limits light uptake for the plant.

The presence of bicarbonates in irrigation water causes the precipitation of calcium ion (Ca^{2+}) and thus increases the risk of Na^+ in the soil. This is why, in our study, when calculating the adjusted RAS, we obtained a value of 19.59, which almost doubles the value of the original RAS of 10.83 (Table 2). This is a further highlighted risk of using this water.

The distribution of soluble salts in the water indicates that there was a predominance of sodium chloride with values greater than 17 meq L^{-1} (Table 1), followed in order of abundance by sodium and magnesium sulphates, with values of approximately 5 meq L^{-1} each, and finally by calcium bicarbonate with a low value (1.86 meq L^{-1}). Calcium sulphate (gypsum) was only present in three of the samples and showed a very low average value (0.23 meq L^{-1}). Irazoke *et al.* (2021), evaluating rice performance under saline conditions, indicated that sodium chloride was more toxic than sodium sulphate, and it was the common salt which most affected plant yield.

It should be noted, then, that the soil and water characteristics do not seem adequate for good rice productivity. However, the yields shown by the crop do not reflect such a drastic decrease as expected according to the salinity reduction tables. A possible explanation could be based on the type of irrigation that keeps the salts diluted and does not allow them to concentrate at their most damaging levels, and at the same time, by keeping the soil flooded, there is water available for the plant at all times.

The high availability of water in the soil corresponds to a scarce supply of oxygen to the roots, but as already mentioned, the rice plant has an aerenchyma tissue that allows it to overcome this disadvantage. In turn, the salinity of the water helps to compensate for the risk against soil permeability due to high Na^+ contents. On the other hand, it is to be expected that responses of the materials to the environmental conditions, such as soil salinity or water studied here, are influenced by the genotype, and their adaptation is expressed as a function of their intrinsic capacity for growth and root development, as well as fresh matter production.

CONCLUSIONS

A high percentage of the soils in the Yaguachi, Ecuador sub-basin, dedicated to rice cultivation, have high levels of salinity. In turn, the water used for irrigation has a moderately high electric conductivity and high sodium levels that can affect soil permeability. Nevertheless, the plant behaves in the conditions of the canton of San Jacinto de Yaguachi as moderately tolerant to salinity, which is attributed to the flood irrigation system, characteristic in the management of rice.

REFERENCES

- Abdallah CK, Mourad KA. 2021. Assessing the quality of water used for vegetable irrigation in Tamale Metropolis, Ghana. *Scientific Reports* 11: 5314. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84617-8>
- Ayers RS, Westcot DW. 1994. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper. 29, Rev. 1. Roma, Italy. <http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E00.htm> (Retrieved: November, 2022)
- Badawy SA, Zayed BA, Bassiouni SMA, Mahdi AHA, Majrashi A, Ali EF, Seleiman MF. 2021. Influence of nano silicon and nano selenium on root characters, growth, ion selectivity,

- yield, and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity conditions. *Plants* 10: 1657. <https://doi.org/10.3390/plants10081657>
- Bajwa MS. 1982. A study on the salt and sodium tolerance of rice. *Journal of Agricultural Science (Camb.)* 98: 475–482. <https://doi.org/10.1017/S0021859600054216>
- Bower C A, Ogata G, Tucker JM. 1968. Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. *Soil Science* 106: 29–34. <https://n9.cl/czj8a>
- Chen T, Shabala S, Niu Y, Chen ZH, Shabala L, Meinke H, Venkataraman G, Pareek A, Xu J, Zhou M. 2021. Molecular mechanisms of salinity tolerance in rice. *The Crop Journal* 9: 506–520. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.03.005>
- Cristo-Valdés E, González MC, Ventura E, Rodríguez AT. 2018. Efecto de la salinidad en estadios iniciales del desarrollo de tres cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales* 39: 65–70. <https://n9.cl/wlgpt>
- Dou F, Soriano J, Tabien R, Chen K. 2016. Soil texture and cultivar effects on rice (*Oryza sativa*, L.) grain yield, yield components and water productivity in three water regimes. *PLoS ONE* 11: e0150549. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150549>
- El-Aziz S. 2017. Evaluation of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in the north-western area of Libya (Aligeelat). *Environmental Earth Science* 76: 147. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6421-3>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2015. Portal de Suelos. Rome. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/es/> (Retrieved: June 2022).
- Fipps G. 2003. Irrigation water quality standards and salinity management strategies. Texas Agricultural Extension Service, Texas A&M University System, College Station, TX (USA). B-1667: 1–19. <https://n9.cl/v1cqs>
- Gardi C, Angelini M, Barcelo S, Comerma J, Cruz C, Rojas AE, Jones A, Krasilnikov P, Mendoca-Santos ML, Montanarella L, Muñiz O, Schad P, Vara MI, Vargas R. 2014. Atlas de Suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea- Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg. 176 p. <https://doi.org/10.2788/37334>
- Giao NT. 2021. Assessing impact of saline intrusion on rice cultivating area in Ke Sach district, Soc Trang province, Vietnam. *Journal of Agriculture and Applied Biology* 2: 41–52. <http://dx.doi.org/10.11594/jaab.02.01.06>
- Hafez EM, Gowayed SM, Nehela Y, Sakran RM, Rady AMS, Awadalla A, El-Dein Omara A, Alowaiesh BF. 2021. Incorporated biochar-based soil amendment and exogenous glycine betaine foliar application ameliorate rice (*Oryza sativa* L.) tolerance and resilience to osmotic stress. *Plants* 10: 1930. <https://doi.org/10.3390/plants10091930>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). 2021. Anuarios Meteorológicos 2000-2020 publicados por el Instituto. Estación meteorológica Milagro, Guayas, Quito. <https://inamhi.wixsite.com/inamhi/novedades> (Retrieved: July 2021).
- INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias). 2014. Superficie de las provincias de Manabí, Guayas y El Oro con problemas de salinidad. INIAP, Quito. <https://n9.cl/1kbtm> (Retrieved: July 2021).
- Irakoze W, Prodjimoto H, Nijimbere S, Rufyikiri G, Lutts S. 2021. NaCl and Na₂SO₄ salinities have different impact on photosynthesis and yield-related parameters in rice (*Oryza sativa* L.). *Agronomy* 10 (6): 864. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060864>
- Khanam T, Akhtar N, Halim MA, Hossain F. 2018. Effect of irrigation salinity on the growth and yield of two Aus rice cultivars of Bangladesh. *Jahangirnagar University Journal of Biological Sciences* 7 (2): 1–12. <https://doi.org/10.3329/jujbs.v7i2.40742>
- Kumar A, Singh S, Mukherjee A, Rastogi RP, Verma JP. 2020. Salt-tolerant plant growth-promoting *Bacillus pumilus* strain JPVS11 for enhancing plant growth attributes of rice and soil health management under salinity stress. *Microbiological Research* 242: 126616. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126616>
- Lan P, Nguyen N, Nguyen HT, Nguyen LT. 2021. Rice growth, grain zinc, and soil properties under saline irrigation conditions. *Journal of Ecological Engineering* 22: 59–70. <https://doi.org/10.12911/22998993/141475>

- Loera-Alvarado L, Torres-Aquino M, Martínez-Montoya JF, Cisneros-Almazán R, Martínez-Hernández, J. 2019. Calidad del agua de escorrentía para uso agrícola captada en bordos de almacenamiento. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 6 (17): 283–295. <https://doi.org/10.19136/era.a6n17.1867>
- Matthess G. 1982. *The Properties of Ground water*. John Wiley & Sons, New York.
- Medina RC, García SJ, Carrillo MD, Pérez-Almeida I, Parismoreno L, Lombeida E. 2022. Effect of mineral and organic amendments on rice growth and yield in saline soils. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 21: 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.06.015>
- Monge MA. 2018. *Diseño Agronómico e Hidráulico de Riegos Agrícolas a Presión*. Editorial Agrícola Española. Madrid. <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/disenio-agronomico-e-hidraulico-riegos-contenido> (Retrieved: June 2022).
- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 59: 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Neina D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science* 5794869. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Peinado H, Green C, Herrera J, Escolero O, Delgado O, Belmonte S, Ladrón de Guevara MA. 2011. Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera. *Hidrobiológica* 21: 63–76.
- Pozo W, Carrera G, Sanfeliu T. 2010. Variabilidad espacial temporal de la salinidad del suelo en los humedales de arroz de la cuenca baja del río Guayas, Sudamérica. *Revista Tecnológica-ESPOL* 23 (1): 73–79. <https://n9.cl/1tz1k>
- Pundir P, Devi A, Krishnamurthy SL, Sharma PC, Vinaykumar NM. 2021. QTLs in salt rice variety CSR10 reveals salinity tolerance at reproductive stage. *Acta Physiologiae Plantarum* 43: 35. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03183-0>
- Rodríguez-Ledesma ND, Torres-Sevillano CN, Chaman-Medina ME, Hidalgo-Rodríguez JEM. 2019. Efecto del estrés salino en el crecimiento y contenido relativo del agua en las variedades IR-43 y amazonas de *Oryza sativa* “arroz” (Poaceae). *Arnaldoa* 26: 931–942. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26305>
- Shan SY, Lv M, Zuo W, Tang Z, Ding C, Yu Z, Shen Z, Gu C, Bai Y. 2021. Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat. *Scientific Reports* 11: 1402. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80358-2>
- Willadino L, Rangel-Camara T. 2010. Tolerância das plantas à salinidade: Aspectos fisiológicos e bioquímicos. *Enciclopédia Biosfera* 6 (11). <https://n9.cl/k0sw8>

SALINIDAD DEL SUELO Y AGUA DE RIEGO SOBRE PRODUCTIVIDAD DEL ARROZ EN EL CANTÓN DE SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR

Reina Concepción Medina-Litardo¹, Sady Javier García-Bendezú², Manuel Danilo Carrillo-Zenteno³, Iris Perez-Almeida*, Edwin Hasang-Moran⁵

¹ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Agrarias. Guayaquil, Ecuador.

² Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Agronomía. La Molina, Perú.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Pichilingue, Ecuador.

⁴ Universidad Ecotec. Centro de Estudios para el Desarrollo Sostenible. Samborondon, Ecuador.

⁵ Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Babahoyo, Ecuador.

* Autor para correspondencia: iperez@ecotec.edu.ec

RESUMEN

La superficie de suelos agrícolas afectados con salinidad causa degradación y reducción de la producción de los cultivos, e impacta negativamente la economía de los agricultores. El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la calidad del agua y la salinidad del suelo sobre la producción de arroz en la subcuenca del río Yaguachi, Ecuador. Para ello, se georreferenciaron y analizaron 99 muestras de suelo en una superficie de 19 027 ha, así como muestras de agua representativas del área bajo estudio. Se elaboraron mapas de pH y conductividad eléctrica (CE) de los suelos y se realizó un análisis de regresión entre la CE y el rendimiento de arroz en 34 parcelas productoras. Se encontró que la textura predominante de los suelos es arcillosa, con pH promedio de 6.73, el 38.4 % de las muestras presentaron CE entre 3.8 y 7.1 dS m⁻¹. El rendimiento del arroz disminuyó paulatinamente a medida que fue cultivado en suelos con mayor salinidad y se encontró que el 26.81 % de la pérdida de rendimiento se atribuye al incremento de la CE. La salinidad del agua de riego y otros indicadores de calidad como son el porcentaje de sodio (Na⁺) soluble y la relación de adsorción de sodio (RAS) clasificaron al agua como con severa restricción para su uso. Sin embargo, ya que los rendimientos del cultivo no presentaron una reducción tan drástica como se esperaba, puede decirse que la planta de arroz se comporta en las condiciones del cantón de San Jacinto de Yaguachi como moderadamente tolerante a la salinidad.

Palabras clave: conductividad eléctrica, Ecuador, relación de adsorción de sodio - RAS, regresión, Yaguachi

INTRODUCCIÓN

La salinidad de los suelos es uno de los problemas que más afecta a los agroecosistemas del mundo. El origen de los suelos, el uso de aguas de riego salinas y la fertilización excesiva se describen como las causas principales de la salinización (FAO, 2015). En Ecuador, la formación de suelos salinos ha sido reportada por Pozo *et al.* (2010),

Citation: Medina-Litardo RC, García-Bendezú SJ, Carrillo-Zenteno MD, Perez-Almeida I, Hasang-Moran E. 2022. Salinidad del suelo y agua de riego sobre productividad del arroz en el cantón de San Jacinto de Yaguachi, Ecuador. *Agrociencia*. 56(7): 1404-1430. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i7.2602>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: April 14, 2022.

Approved: July 05, 2022.

Published in Agrociencia:

December 05, 2022.

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



especialmente en las áreas planas de la vertiente costera; Guayas es la provincia más afectada (INIAP, 2014).

El arroz es sensible a la salinidad, en especial en los estados de plántula, al final de la fase vegetativa e iniciación de la panícula hasta la floración (Munns y Tester, 2008). La planta es relativamente tolerante durante la germinación, así como a lo largo de las etapas de llenado y maduración del grano. La salinidad retrasa el espigado y la floración, lo cual incrementa la esterilidad de las espigas, reduce el peso y el contenido total de carbohidratos en el grano, y al final disminuye el rendimiento. Valores de CE en el suelo superiores a 3.8 dS m^{-1} pueden generar pérdidas de rendimiento mayores al 25 % (Willadino y Rangel, 2010).

En el cantón San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador, se cultivan 3000 ha de arroz bajo inundación. Esta superficie es irrigada durante la época seca (junio a diciembre) con agua del río Yaguachi. Sus aguas salinas, debido a las mareas, se extienden hacia el interior del continente, hasta unos 100 km a través de sus afluentes; pues hay intrusión de agua salina en la zona bajo estudio (Medina *et al.*, 2022).

El objetivo de este estudio fue determinar el grado de afectación por salinidad en los suelos y el efecto del agua de riego en el cantón San Jacinto de Yaguachi, así como el efecto de los niveles salinos sobre el rendimiento de los sistemas de producción de arroz.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el cantón San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador, entre las coordenadas $2^{\circ} 5' 15'' - 2^{\circ} 6' 14'' \text{ N}$ y $79^{\circ} 40' 51'' - 79^{\circ} 42' 03'' \text{ O}$. El cantón San Jacinto de Yaguachi tiene un clima tropical de sabana (Aw) de acuerdo con la clasificación climática de Köppen. Según los registros del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (de Ecuador; INAMHI, 2021), la precipitación es marcadamente estacional, con un promedio anual de 1250 mm concentrados casi en su totalidad en los meses de enero a mayo, y la temperatura media mensual varía entre 24.0 y 27.2 °C. Los suelos son clasificados como vertisoles, caracterizados por un alto contenido de arcilla expansiva 2:1; tienen mal drenaje y al secarse forman grietas anchas y profundas (Gardi *et al.*, 2014).

Muestreo de suelo y agua

El muestreo de los suelos fue realizado en septiembre de 2018, un período sin lluvias. El área de estudio comprendió 19 027 ha ubicadas en las dos márgenes del río Yaguachi, zona donde se seleccionaron 99 parcelas agrícolas en forma aleatoria. Se destacan los puntos de muestreo dentro del área de estudio (Figura 1A).

Se tomaron muestras compuestas de suelo (15 submuestras) en el estrato 0–20 cm de cada parcela. Para el muestreo del agua, se seleccionaron cinco sitios distribuidos entre los canales de riego dentro del área de estudio. Las muestras compuestas se tomaron en el centro de cada canal de riego, a 10 cm por debajo de la superficie con botellas de polietileno. Las muestras permanecieron en refrigeración a 4 °C hasta el

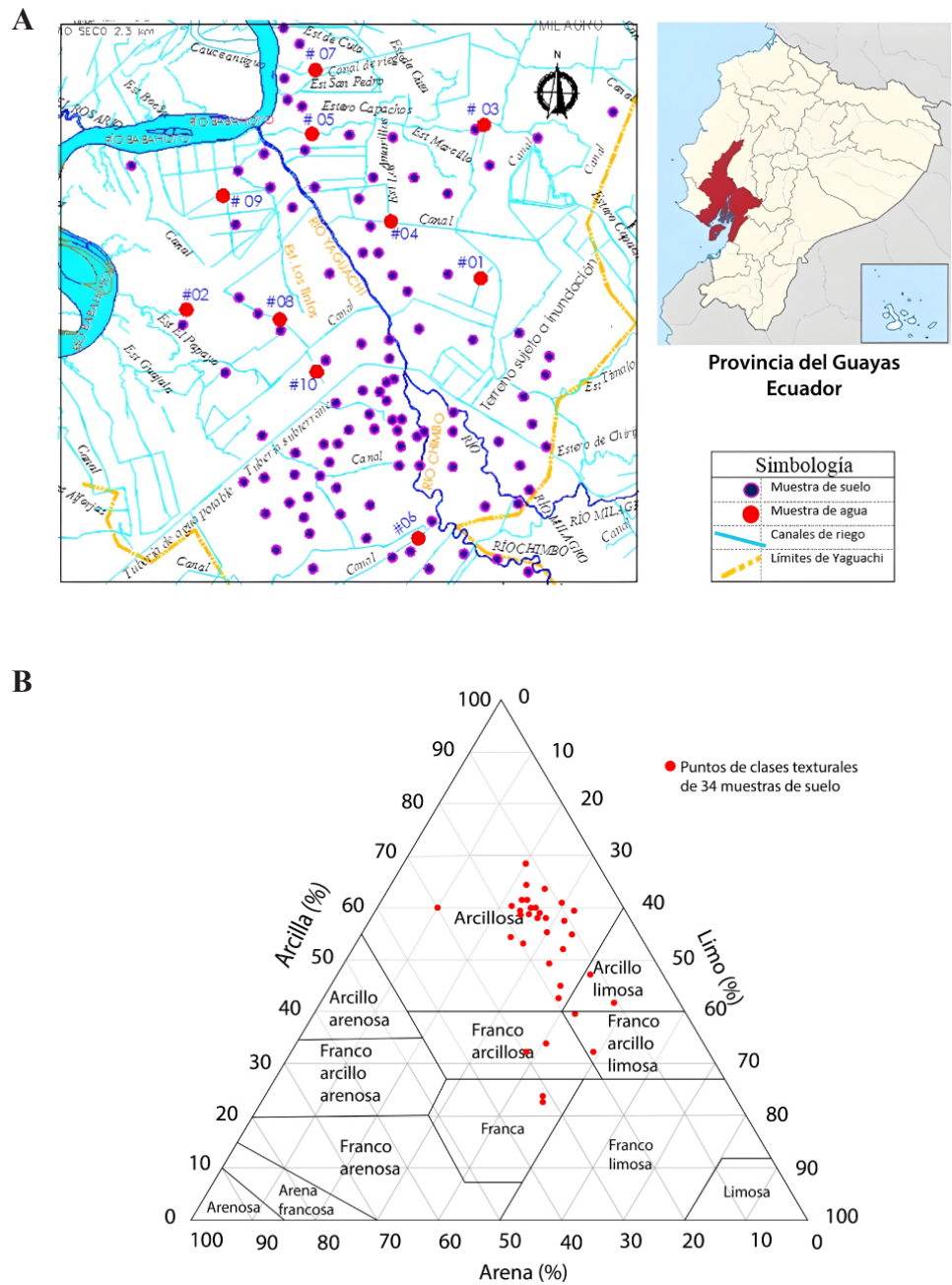


Figura 1. Muestras provenientes del cantón de San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador. A. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo y agua (puntos azules y rojos, respectivamente). B. Ubicación de los suelos dentro del triángulo textural.

momento de su análisis. Tanto los puntos del muestreo de suelo como de agua fueron georreferenciados con GPS.

Análisis de suelo y agua

Los análisis de suelo y agua se realizaron en el Laboratorio Químico del Centro Investigación de Caña de Azúcar del Ecuador (CINCAE). Se determinaron propiedades físicas y químicas del suelo, textura, CE y pH en la mezcla saturada.

En las muestras de agua se determinó el pH, la CE, y los contenidos de Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, bicarbonato, cloruro y sulfato. Además, se calculó la RAS original y ajustada (RASaj) a través de la siguiente fórmula (concentraciones en meq·L⁻¹):

$$RAS = Na / [(Ca + Mg) / 2]^{1/2}$$

Para la RASaj se reemplazó la concentración de Ca por la concentración que se espera que permanezca en la solución del suelo luego de alcanzar condiciones de equilibrio, según el procedimiento descrito por Bower (1968). Además, se calculó el porcentaje de sodio soluble (PSS) en el agua, según la fórmula de Doneen: PSS = 100 * Na⁺ / (Na⁺ + Ca⁺² + Mg⁺² + K⁺).

La conformación de las sales solubles se realizó a partir de la composición de los iones solubles y para estimar la precisión de los análisis químicos del agua se utilizó la ecuación del error de equilibrio iónico, según Matthes (1980): e = 100 * (sc - sa) / (sc + sa), donde e: error porcentual, sc: suma de cations y sa: suma de aniones (ambos en meq L⁻¹).

Por otra parte, se dispuso de información por parte de los agricultores en relación con los rendimientos obtenidos en sus parcelas de arroz. Dentro de los 99 puntos de muestreo se encontraron 34 fincas donde existían datos precisos del rendimiento promedio de arroz. Con esta información se realizó un análisis de regresión exponencial entre la CE del suelo y el rendimiento del cultivo para expresar la tendencia de los rendimientos decrecientes.

Elaboración de los mapas de pH y CE

Las coordenadas geográficas de cada uno de los 99 puntos de muestreo y sus correspondientes valores de pH y CE se colocaron en una tabla de Excel, la cual se añadió al sistema de información geográfica (SIG). Se realizó la interpolación y se trazaron las isolíneas correspondientes del pH y CE. Después se elaboró el mapa de rendimiento esperado en función de la CE del suelo a partir de los valores referenciales de Willadino y Rangel (2010).

El análisis de regresión se realizó con el programa Costat (Cohort) versión 6.4; en tanto que, las concentraciones iónicas se analizaron con técnicas de estadística descriptiva como medidas de tendencia central y dispersión en Minitab® version 19.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Suelo

De 34 parcelas arroceras, el 76.5 % del suelo estudiado es de clase textural arcillosa, seguido de un 5.9 % como franco, franco arcilloso, franco arcillo limoso y arcillo limoso (Figura 1B). Con más de 35 % arcilla plástica y pegajosa y 50 % de la fracción de arcilla expansiva (2:1) de tipo montmorillonita, los suelos se clasificaron como vertisoles (la gran mayoría de los suelos presentaron altos a muy altos contenidos de arcilla). Los suelos pesados, como los arcillosos, usualmente tienen mayor fertilidad y capacidad de retención de agua que los suelos livianos y su principal limitante para el crecimiento de los cultivos es su baja circulación de oxígeno. Ya que el arroz posee el tejido conocido como aerénquima, el cual puede proveer de oxígeno a las raíces en condiciones de inundación, es un cultivo ideal para este tipo de suelos, en particular cuando se utiliza el sistema de riego por inundación. Al respecto, Dou *et al.* (2016) mencionaron que en suelos arcillosos el arroz aumentó significativamente su rendimiento de grano y acumulación de biomasa en comparación con aquellos cultivados en suelos francos y arenosos.

pH y CE

El pH encontrado tuvo una media de 6.73 en una amplitud entre 5.90 a 7.55; se observó que 5766 ha (30.33 %) son suelos ligeramente ácidos, mientras que el 66.67 %, que corresponde a 13 261 ha, mostraron pH prácticamente neutro de 6.5 a 7.5 (Figura 2A). Se puede considerar como normal que los suelos en las parcelas cultivadas de arroz en el cantón de San Jacinto de Yaguachi posean valores de pH cercanos a la neutralidad como consecuencia de los riegos por inundación utilizando agua con pH cercano a 7, como se puede ver más adelante. El pH óptimo para el arroz es 6.6, pues con ese valor es alta la liberación microbiana de nitrógeno (N) y fósforo (P) de la materia orgánica, a la vez que los metales tales como aluminio (Al), manganeso (Mn) y hierro (Fe) están por debajo del nivel tóxico. Fuera de este intervalo, se generan condiciones desfavorables para el crecimiento de las plantas; ya que con pH bajo se producen deficiencias de Ca y Mg y contenidos altos de Al, así como alta fijación de P, mientras que con pH alto puede haber insuficiencia de micronutrientes solubles (Neina, 2019). Respecto a la CE, el 24.24 % de las muestras (4612 ha) presentaron un valor de 3.8 a 5.1 dS m^{-1} , y el 14.14 % (2690 ha) intervalos de 5.1 a 7.2 dS m^{-1} . Según Willadino y Rangel (2010), con los intervalos de salinidad antes mencionados la producción de arroz podría disminuir en 25 y 50 %, respectivamente (Figura 2B).

El rendimiento del arroz disminuyó paulatinamente a medida que fue cultivado en suelos con mayor salinidad siguiendo una tendencia exponencial (Figura 3) y se encontró que el 30.15 % de la pérdida de rendimiento podría atribuirse al incremento de la CE. Es decir, casi un tercio de la disminución del rendimiento es ocasionada por la salinidad del suelo. Aunque este grado de asociación entre el rendimiento y la salinidad, aparentemente, no es muy alto, se deben tomar en cuenta al menos dos consideraciones. La primera es que la vinculación entre ambas variables resultó altamente significativa ($p \leq 0.01$), es decir, que la asociación entre ellas realmente existe.

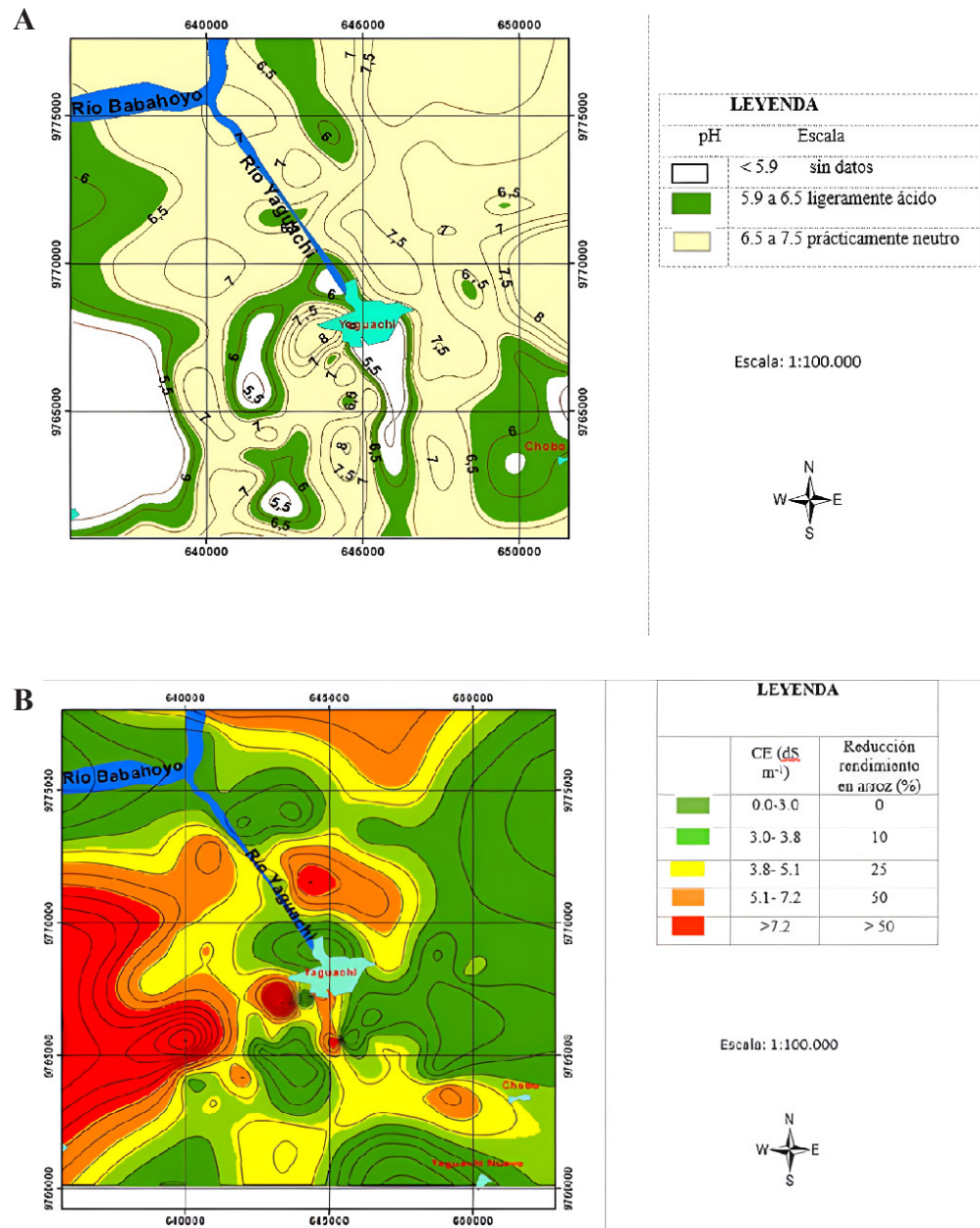


Figura 2. Distribución de características químicas del suelo en las fincas dentro del área de estudio en el cantón de San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador (n = 99 muestras). A. pH. B. Conductividad eléctrica (CE) y reducción estimada en el rendimiento del arroz (según Willadino y Rangel, 2010).

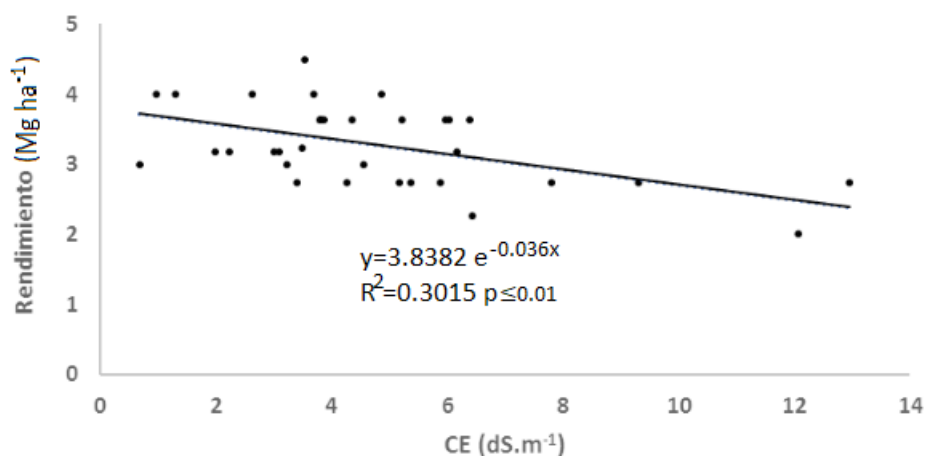


Figura 3. Análisis de regresión exponencial entre la CE del agua de riego y el rendimiento del arroz en 34 fincas del área de estudio en el cantón de San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador.

La segunda, que hay otros factores involucrados en el proceso y que fueron señalados por los diferentes productores, tales como diferencias en el manejo del cultivo, uso o no de semilla certificada, intenso o escaso control de plagas y enfermedades, entre otros. Además pueden influir otras prácticas culturales inapropiadas como fertilización inadecuada, baja o nula incorporación de materia orgánica, excesivas aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, no realizar análisis de suelo, y controles de malezas inadecuados. A pesar de todo, la línea de regresión en la figura muestra que la planta mantuvo un rendimiento cercano a 2.5 Mg ha⁻¹ ante una CE superior a 12 dS m⁻¹.

La planta de arroz es altamente tolerante al anegamiento, lo cual puede favorecer su desempeño en los suelos salinos del estudio debido a que el riego por inundación, donde se mantiene el agua estancada, puede producir reducción de la salinidad en la zona de las raíces por lavado y dilución de las sales (FAO, 2015). El conjunto de observaciones anteriores sugiere que la planta de arroz se comporta en las condiciones del cantón de San Jacinto de Yaguachi como moderadamente tolerante a la salinidad. Giao (2021) encontró una reducción de hasta el 30 % en el rendimiento promedio de diferentes variedades de arroz cuando la salinidad del suelo alcanzó un valor de 3.87 % (aproximadamente 6 dS m⁻¹) debido a intrusión salina, lo cual indica que en dicho estudio existieron rendimientos medianamente aceptables a pesar del alto valor de salinidad. Por el contrario, Lan (2021) detectó en la variedad H78 una reducción del rendimiento de 58.6 % cuando la CE del medio alcanzó aproximadamente 4.7 dS m⁻¹ y no obtuvo rendimiento cuando la CE se aproximó a 8 dS m⁻¹.

Lo anterior indica que existen diferentes índices de tolerancia a la salinidad asociados a diferencias varietales en plantas de arroz, tal como señalaron Cristo-Valdés *et al.* (2018). Las diferencias en rendimiento atribuidos al estrés salino se observan principalmente en el número de panículas y de tallos por planta (Khanam *et al.*, 2018). Rodríguez *et al.* (2019) mencionaron que los mecanismos que explican las diferencias

en la respuesta al estrés salino en variedades de arroz se asocian con las diferencias en su capacidad de ajuste osmótico.

En una revisión reciente, Chen *et al.* (2021) resumieron la información sobre los principales mecanismos moleculares que subyacen a la tolerancia a la salinidad en el arroz y destacaron que numerosas familias de genes y redes de interacción están involucrados en la regulación de la respuesta. Al respecto, Pundir *et al.* (2021) identificaron recientemente en arroz locus de caracteres cuantitativos (QTL) para tolerancia al estrés salino que pueden ser ventajosos en los programas de mejora genética para el desarrollo de variedades tolerantes a la salinidad en etapa reproductiva.

Agua

En los valores de las características químicas del agua de riego (Cuadro 1), se observó que en todas las muestras la concentración total de los iones negativos (aniones) superó al de los positivos (cationes). Lo cual permite suponer que tal vez algún catión de importancia, como el K^+ o el Fe^{+2} (ion ferroso), no fue incluido en el análisis; aunque se sabe que estos iones usualmente se encuentran en bajas concentraciones en las aguas naturales. Por tal razón, al evaluar la precisión de los análisis del agua a partir de su equilibrio iónico, se consideró como aceptable un análisis que cumpliera con un error de balance ligeramente superior al usual, pero siempre dentro de un intervalo restringido a un dígito porcentual (es decir, menor a 10 %). El error promedio obtenido fue de 7.15 % (Cuadro 2).

El pH de las cinco muestras mostró valores cercanos entre sí y varió entre 6.44 y 7.01, con un promedio de 6.77 que la clasifica como un agua prácticamente neutra (Cuadro 2). Desde este punto de vista, no presenta problemas para uso como riego según los criterios de clasificación de Ayers y Westcot (1994).

Cuadro 1. Concentración de iones y sales solubles en el agua de riego del arroz en el cantón de San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador.

Muestra	Iones (meq L ⁻¹)						Sales (meq L ⁻¹)					
	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	CaSO ₄	MgSO ₄	Na ₂ SO ₄	NaCl
1	20.85	2.76	6.22	19.45	2.43	10.72	2.43	0	0.33	6.22	4.17	16.68
2	22.39	1.25	4.79	20.13	1.27	9.92	1.25	0.02	0	4.77	5.15	17.75
3	19.25	2.48	5.61	19.04	2.08	12.21	2.08	0	0.4	5.61	6.6	12.65
4	21.12	2.86	6.18	20.40	2.44	12.36	2.44	0	0.42	6.18	6.18	20.4
5	19.55	1.09	4.28	18.64	1.76	9.41	1.09	0.67	0	4.28	5.13	18.64
Media	20.63	2.09	5.42	19.53	2.00	10.92	1.86	0.14	0.23	5.41	5.45	17.22
Máxima	22.39	2.86	6.22	20.40	2.44	12.36	2.44	0.67	0.42	6.22	6.6	20.4
Mínima	19.25	1.09	4.28	18.64	1.27	9.41	1.09	0	0	4.28	4.17	12.65
SD	1.27	0.85	0.86	0.73	0.49	1.33	0.65	0.30	0.21	0.86	0.96	2.90
CV	6.16	40.78	15.86	3.76	24.74	12.16	26.52	44.41	50.62	13.87	14.54	14.20

Na⁺: ion sodio; Ca⁺²: ion calcio; Mg⁺²: ion magnesio; Cl⁻: cloruro; HCO₃⁻: bicarbonato; SO₄⁻²: sulfato; Ca (HCO₃)₂: bicarbonato de calcio; Mg (HCO₃)₂: bicarbonato de magnesio; CaSO₄: sulfato de calcio; MgSO₄: sulfato de magnesio; Na₂SO₄: sulfato de sodio; NaCl: cloruro de sodio.

Cuadro 2. Indicadores de calidad del agua de riego del arroz y estimación del error analítico en el cantón de San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador.

Muestra	pH	CE (dS·m ⁻¹)	PSS	RAS	RASaj	Error (%)
1	6.91	2.49	69.90	9.84	19.09	4.44
2	6.44	2.84	78.75	12.88	17.78	4.84
3	6.78	2.53	70.41	9.57	18.19	9.87
4	6.7	2.63	70.03	9.93	19.87	7.71
5	7.01	2.32	78.45	11.93	23.03	8.93
Media	6.77	2.56	73.51	10.83	19.59	7.15
Máximo	7.01	2.84	78.75	12.88	23.03	
Mínimo	6.44	2.32	69.90	9.57	17.78	
SD	0.22	0.19	4.66	1.48	2.08	
CV	3.23	7.47	6.33	13.69	10.64	

CE: conductividad eléctrica, RAS y RASaj: relación de adsorción de sodio original y ajustada, respectivamente.

La CE del agua no presentó variaciones importantes, mostró valores entre 2.32 y 2.84 dS m⁻¹ con un coeficiente de variación de 7.47 % (Cuadro 2). El cual significa que el agua presentaría restricción de uso de ligero a moderado si se toma en consideración que se encuentra dentro del intervalo 0.7 a 3.0 dS·m⁻¹ (Abdallah y Mourad, 2021). No obstante, según los criterios del Salinity Laboratory Staff (El-Aziz, 2017), el agua se clasifica como de salinidad muy alta que debe utilizarse en suelos con buen drenaje, para cultivos muy tolerantes a la salinidad; es decir, no sería recomendada para el cultivo de arroz bajo estudio.

La CE del agua, como indicador del riesgo de salinidad, es el parámetro de calidad más importante para la productividad de los cultivos. En principio, el agua con alta salinidad causa problemas físicos por su alta concentración iónica que causa una disminución del agua útil para las plantas por la reducción de su potencial osmótico. Lo cual significa que aunque el suelo tenga alta humedad, las plantas sufren estrés hídrico debido a la dificultad de las raíces para absorberla. De forma simultánea o después, se pueden presentar problemas de tipo químico o tóxico en la planta, ocasionados por iones específicos como el cloro o sodio (Fipps, 2003).

La moderadamente alta CE registrada en el agua del área en estudio puede reflejar el enriquecimiento por algunas sales a medida que existe la intrusión salina en el río Yaguachi producto del ingreso de las mareas, como son sulfato de calcio, sulfato de magnesio, sulfato de sodio, y cloruro de sodio.

La RAS alcanzó una media de 10.83 (Cuadro 2), valor que se considera con riesgo de toxicidad para los cultivos según los criterios señalados por Ayers y Westcot (1994). El valor de la RAS es un índice útil para estimar el riesgo que implica el nivel de sodio del agua tanto para cultivos como para suelos.

El uso de esta agua con fines de riego no se considera de alto riesgo para el suelo al utilizarla en muchos suelos livianos, pero en vertisoles como aquellos del área bajo

estudio, con más del 50 % de arcillas expansivas (montmorillonita) se magnifica el riesgo de afectar la permeabilidad por efecto del sodio. En este caso, según el criterio anterior, podrían existir problemas severos de dispersión del suelo cuando se alcancen valores de RAS superiores a nueve.

El uso continuado de agua con valores de RAS elevados puede conducir a un deterioro de la estructura física del suelo, ya que el Na^+ se adhiere a las arcillas y rompe los agregados del suelo, cuyas partículas van a taponar los poros y a hacer los suelos cada vez más impermeables a la penetración del agua y el aire (Fipps, 2003). No obstante, en una investigación llevada a cabo con diferentes variedades de arroz sometidas a diferentes concentraciones salinas y valores de RAS en el medio de cultivo, Bajwa (1982) encontró que el daño por salinidad era menor cuando existían valores altos de RAS en el agua de riego. Por lo tanto, concluyó que el arroz, aunque se considera moderadamente sensible a las condiciones salinas, resulta ser muy tolerante a las condiciones sódicas. Lo anterior sugiere que el nivel de daño que produce la salinidad en el arroz depende de una estrecha interacción entre la CE y la RAS en el medio de crecimiento. El porcentaje de sodio soluble en las muestras de agua fue bastante alto y varió entre 69.90 y 78.75, con un valor medio de 73.51 (Cuadro 2). Este es un valor alto si se compara con los límites críticos de Doneen (Loera-Alvarado *et al.*, 2019). En las aguas naturales, el contenido de sodio es un parámetro común para evaluar su aptitud para fines de riego, ya que este elemento puede afectar la permeabilidad del suelo, como ya se mencionó. El exceso de sodio combinado con los iones carbonato conduce a la formación de suelos alcalinos, mientras que con el cloruro participa en la formación de suelos salinos. El agua de riego que contiene grandes cantidades de sodio es de especial preocupación no sólo por el efecto en el suelo sino también por su posible efecto tóxico en la planta. El diagrama de Wilcox (Peinado *et al.*, 2011) que relaciona el porcentaje de sodio y la CE, señala que todas las muestras de agua fueron clasificadas como inapropiadas o de dudosa aceptación (Figura 4).

La concentración del resto de los iones del agua indica valores promedio de Ca^{+2} y Mg^{+2} de 2.09 y 5.42 meq L^{-1} , respectivamente (Cuadro 1). Por ello, según los patrones de interpretación de Monge (2018) para aguas de riego, el Ca se encontraría en concentraciones normales y el Mg ligeramente alto. Los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} pueden ayudar a contrarrestar los efectos del Na^+ y ayudar a mantener las propiedades del suelo. Por otra parte, cantidades excesivas de Ca^{+2} pueden restringir la disponibilidad de fósforo (P), boro (B) y hierro (Fe) para las plantas (FAO, 2015).

El anión cloruro mostró un valor promedio de 19.53 meq L^{-1} (Cuadro 1), lo cual destaca la condición salina del agua. Según la clasificación de Ayers y Westcott (1994), concentraciones superiores a 10 meq L^{-1} crean restricciones severas de uso del agua para el riego de muchos cultivos, incluido el arroz.

El anión sulfato mostró una concentración media de 10.92 meq L^{-1} (Cuadro 1) la cual se considera aceptable. En cantidades muy altas, sus sales pueden afectar a los cultivos sensibles al limitar la absorción de Ca^{+2} y aumentar la absorción de Na^+ y K^+ , y provocar así una alteración del equilibrio catiónico dentro de la planta.

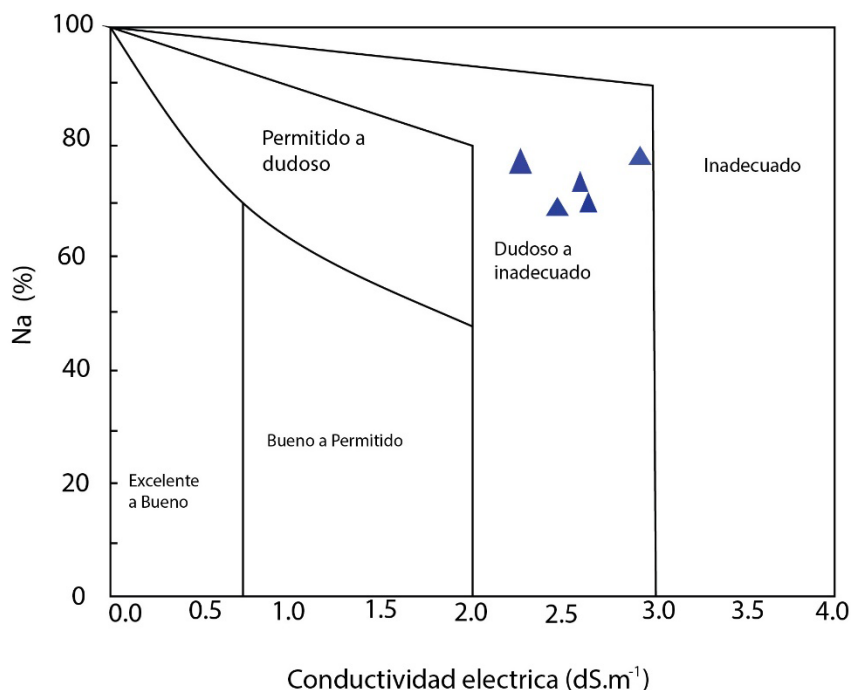


Figura 4. Nomograma de Wilcox con valores de cinco muestras del agua de riego del área de estudio en el cantón de San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador.

Para los bicarbonatos, en el análisis del agua, se detectó un valor medio de 2.0 meq L⁻¹, con un mínimo con 1.27 y máximo de 2.44 meq L⁻¹ (Cuadro 1). Aunque este ion normalmente no es tóxico a la planta, presenta un grado restricción de leve a moderado para riego por aspersión, según Ayers y Westcot (1994). Esto es debido a que al evaporarse el agua, queda en las hojas un precipitado blanquecino de bicarbonato de calcio que limita la captación de luz por la planta.

La presencia de bicarbonatos en el agua de riego ocasiona la precipitación del ion calcio (Ca²⁺) y de esta manera aumenta el riesgo de Na⁺ en el suelo. Es por esto que, en nuestro estudio, al calcular la RAS ajustada se obtuvo un valor de 19.59 el cual casi duplica el valor de la RAS original de 10.83 (Cuadro 2). Esto es un riesgo aún más notable del uso de esta agua.

La distribución de las sales solubles en el agua indica que hubo predominancia del cloruro de sodio con valores superiores a 17 meq L⁻¹ (Cuadro 1), seguido en orden de abundancia por los sulfatos de sodio y de magnesio, con valores de aproximadamente 5 meq L⁻¹ cada uno, y al final por el bicarbonato de calcio con un valor bajo (1.86 meq L⁻¹). El sulfato de calcio (yeso) sólo estuvo presente en tres de las muestras y mostró un valor promedio muy bajo (0.23 meq L⁻¹). Irazoke *et al.* (2021), al evaluar el comportamiento del arroz en condiciones salinas, indicaron que el cloruro de sodio fue más tóxico que el sulfato de sodio, y fue la sal la que afectó mayormente el rendimiento de la planta.

Se destaca, entonces, que las características del suelo y el agua no parecen adecuadas para una buena productividad del arroz. Sin embargo, los rendimientos mostrados por el cultivo no reflejan una disminución tan drástica como la esperada según las tablas de reducción en función de la salinidad. Una posible explicación podría estar basada en el tipo de riego que mantiene diluidas las sales y no permite que se concentren a sus niveles más dañinos, a la vez que al mantener el terreno anegado existe disponibilidad de agua para la planta en todo momento.

La alta disponibilidad de agua en el suelo se corresponde con una escasa suplencia de oxígeno a las raíces, pero como ya se mencionó, la planta de arroz posee un tejido de aerénquima que le posibilita superar ese inconveniente. A su vez, la salinidad del agua ayuda a compensar el riesgo contra la permeabilidad del suelo producto de los altos contenidos de Na^+ . Por otro lado, es de esperar que las respuestas de los materiales a las condiciones ambientales, tales como salinidad de suelos o agua aquí estudiadas, estén influidas por el genotipo, y su adaptación se exprese en función a su capacidad intrínseca de crecimiento y desarrollo radical, así como de producción de materia fresca.

CONCLUSIONES

Un alto porcentaje de los suelos de la subcuenca del río Yaguachi, Ecuador, dedicados al cultivo de arroz, presenta altos niveles de salinidad. A su vez, el agua utilizada para riego muestra una conductividad eléctrica moderadamente alta y niveles de sodio elevados que pueden afectar la permeabilidad de los suelos. No obstante, la planta se comporta en las condiciones del cantón de San Jacinto de Yaguachi como moderadamente tolerante a la salinidad, lo cual se atribuye al sistema de riego por medio de inundación, característico en el manejo del cultivo de arroz.

REFERENCIAS

- Abdallah CK, Mourad KA. 2021. Assessing the quality of water used for vegetable irrigation in Tamale Metropolis, Ghana. *Scientific Reports* 11: 5314. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84617-8>
- Ayers RS, Westcot DW. 1994. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper. 29, Rev. 1. Roma, Italy. <http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E00.htm> (Recuperado: noviembre, 2022)
- Badawy SA, Zayed BA, Bassiouni SMA, Mahdi AHA, Majrashi A, Ali EF, Seleiman MF. 2021. Influence of nano silicon and nano selenium on root characters, growth, ion selectivity, yield, and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity conditions. *Plants* 10: 1657. <https://doi.org/10.3390/plants10081657>
- Bajwa MS. 1982. A study on the salt and sodium tolerance of rice. *Journal of Agricultural Science (Camb.)* 98: 475–482. <https://doi.org/10.1017/S0021859600054216>
- Bower C A, Ogata G, Tucker JM. 1968. Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. *Soil Science* 106: 29–34. <https://n9.cl/czj8a>
- Chen T, Shabala S, Niu Y, Chen ZH, Shabala L, Meinke H, Venkataraman G, Pareek A, Xu J, Zhou M. 2021. Molecular mechanisms of salinity tolerance in rice. *The Crop Journal* 9: 506–520. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.03.005>
- Cristo-Valdés E, González MC, Ventura E, Rodríguez AT. 2018. Efecto de la salinidad en estadios iniciales del desarrollo de tres cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales* 39: 65–70. <https://n9.cl/wlgpt>

- Dou F, Soriano J, Tabien R, Chen K. 2016. Soil texture and cultivar effects on rice (*Oryza sativa*, L.) grain yield, yield components and water productivity in three water regimes. PLoS ONE 11: e0150549. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150549>
- El-Aziz S. 2017. Evaluation of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in the north-western area of Libya (Aligeelat). Environmental Earth Science 76: 147. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6421-3>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2015. Portal de Suelos. Rome. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/es/> (Recuperado: junio 2022).
- Fipps G. 2003. Irrigation water quality standards and salinity management strategies. Texas Agricultural Extension Service, Texas A&M University System, College Station, TX (USA). B-1667: 1–19. <https://n9.cl/v1cqs>
- Gardi C, Angelini M, Barcelo S, Comerma J, Cruz C, Rojas AE, Jones A, Krasilnikov P, Mendoca-Santos ML, Montanarella L, Muñiz O, Schad P, Vara ML, Vargas R. 2014. Atlas de Suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea- Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg. 176 p. <https://doi.org/10.2788/37334>
- Giao NT. 2021. Assessing impact of saline intrusion on rice cultivating area in Ke Sach district, Soc Trang province, Vietnam. Journal of Agriculture and Applied Biology 2: 41–52. <http://dx.doi.org/10.11594/jaab.02.01.06>
- Hafez EM, Gowayed SM, Nehela Y, Sakran RM, Rady AMS, Awadalla A, El-Dein Omara A, Alowaiesh BF. 2021. Incorporated biochar-based soil amendment and exogenous glycine betaine foliar application ameliorate rice (*Oryza sativa* L.) tolerance and resilience to osmotic stress. Plants 10: 1930. <https://doi.org/10.3390/plants10091930>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). 2021. Anuarios Meteorológicos 2000-2020 publicados por el Instituto. Estación meteorológica Milagro, Guayas, Quito. <https://inamhi.wixsite.com/inamhi/novedades> (Recuperado: julio 2021).
- INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias). 2014. Superficie de las provincias de Manabí, Guayas y El Oro con problemas de salinidad. INIAP, Quito. <https://n9.cl/1kbtm> (Recuperado: julio 2021).
- Irakoze W, Prodjinoto H, Nijimbere S, Rufyikiri G, Lutts S. 2021. NaCl and Na₂SO₄ salinities have different impact on photosynthesis and yield-related parameters in rice (*Oryza sativa* L.). Agronomy 10 (6): 864. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060864>
- Khanam T, Akhtar N, Halim MA, Hossain F. 2018. Effect of irrigation salinity on the growth and yield of two Aus rice cultivars of Bangladesh. Jahangirnagar University Journal of Biological Sciences 7 (2): 1–12. <https://doi.org/10.3329/jujbs.v7i2.40742>
- Kumar A, Singh S, Mukherjee A, Rastogi RP, Verma JP. 2020. Salt-tolerant plant growth-promoting *Bacillus pumilus* strain JPVS11 for enhancing plant growth attributes of rice and soil health management under salinity stress. Microbiological Research 242: 126616. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126616>
- Lan P, Nguyen N, Nguyen HT, Nguyen LT. 2021. Rice growth, grain zinc, and soil properties under saline irrigation conditions. Journal of Ecological Engineering 22: 59–70. <https://doi.org/10.12911/22998993/141475>
- Loera-Alvarado L, Torres-Aquino M, Martínez-Montoya JF, Cisneros-Almazán R, Martínez-Hernández, J. 2019. Calidad del agua de escorrentía para uso agrícola captada en bordos de almacenamiento. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 6 (17): 283–295. <https://doi.org/10.19136/era.a6n17.1867>
- Matthess G. 1982. The Properties of Ground water. John Wiley & Sons, New York.
- Medina RC, García SJ, Carrillo MD, Pérez-Almeida I, Parismoreno L, Lombeida E. 2022. Effect of mineral and organic amendments on rice growth and yield in saline soils. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 21: 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.06.015>
- Monge MA. 2018. Diseño Agronómico e Hidráulico de Riegos Agrícolas a Presión. Editorial Agrícola Española. Madrid. <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/disenio-agronomico-e-hidraulico-riegos-contenido> (Recuperado: junio 2022).
- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology 59: 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

- Neina D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science* 5794869. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Peinado H, Green C, Herrera J, Escolero O, Delgado O, Belmonte S, Ladrón de Guevara MA. 2011. Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera. *Hidrobiológica* 21: 63–76.
- Pozo W, Carrera G, Sanfeliu T. 2010. Variabilidad espacial temporal de la salinidad del suelo en los humedales de arroz de la cuenca baja del río Guayas, Sudamérica. *Revista Tecnológica-ESPOL* 23 (1): 73–79. <https://n9.cl/1tz1k>
- Pundir P, Devi A, Krishnamurthy SL, Sharma PC, Vinaykumar NM. 2021. QTLs in salt rice variety CSR10 reveals salinity tolerance at reproductive stage. *Acta Physiologiae Plantarum* 43: 35. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03183-0>
- Rodríguez-Ledesma ND, Torres-Sevillano CN, Chaman-Medina ME, Hidalgo-Rodríguez JEM. 2019. Efecto del estrés salino en el crecimiento y contenido relativo del agua en las variedades IR-43 y amazonas de *Oryza sativa* “arroz” (Poaceae). *Arnaldoa* 26: 931–942. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26305>
- Shan SY, Lv M, Zuo W, Tang Z, Ding C, Yu Z, Shen Z, Gu C, Bai Y. 2021. Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat. *Scientific Reports* 11: 1402. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80358-2>
- Willadino L, Rangel-Camara T. 2010. Tolerância das plantas à salinidade: Aspectos fisiológicos e bioquímicos. *Enciclopédia Biosfera* 6 (11). <https://n9.cl/k0sw8>



Agrociencia

VOLUMEN 56, NÚMERO 7 | 1 DE OCTUBRE - 15 DE NOVIEMBRE, 2022 | MÉXICO