



EFFECT OF BIOFERTILIZATION OF NOPAL VEGETABLE CROPS (*Opuntia ficus-indica*) ON PHYSICOCHEMICAL, PHYTOCHEMICAL AND MORPHOLOGICAL VARIABLES AND ITS RELATIONSHIP WITH BIOMASS PRODUCTION †

[EFECTO DE LA BIOFERTILIZACIÓN DEL CULTIVO DE NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus-indica*) SOBRE VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS, FITOQUÍMICAS Y MORFOLÓGICAS Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA]

Ruy Ortiz-Rodríguez ¹, Manuel Galvan-Aguilar ², Manuel López-Rodríguez ¹, Rosa E. Pérez-Sánchez ^{2*}, Alfonso Luna-Cruz ³ and Gerardo Ordaz-Ochoa ⁴

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Acueducto, Col. Matamoros S/N, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58130 Emails: ruy.ortiz@umich.mx; manuel.lopez@umich.mx

²Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tzintzuntzan No. 173, Col. Matamoros, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58240. Emails: 1637218g@umich.mx; rosa.perez@umich.mx*

³CONAHCYT, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas. Av. Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México. C.P. 58030. Email: alfonso.luna@umich.mx

⁴Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal, INIFAP. Km 1 carretera a Colón, Ajuchitlán, Querétaro, México. C.P. 76280. Email: ordaz.gerardo@inifap.gob.mx

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The nopal is a plant that adapts to various agroecosystems. Its nutritional and nutraceutical characteristics make it important for human and animal consumption. New strategies are required to increase its production and nutritional qualities. **Objective.** To determine the effect of biofertilization (inoculation of *Pseudomonas* sp., *Enterobacter* sp., and *Paenibacillus* sp.) of the vegetable nopal (VN; *O. ficus-indica*) crop on morphology, physicochemical and phytochemical composition and its relationship with biomass production (BP). **Methodology.** The research was carried out in a plot with an area of 750 m² divided into four blocks, each with five treatments (n= 50 VN plants/treatment). The treatments (T) were: T1, chemical fertilizer; T2, bovine compost; T3, chemical fertilizer plus bioinoculant; T4, bovine compost plus bioinoculant and T5, Control (plants without fertilizer). The physicochemical and phytochemical composition, morphology, and crude protein (CP) of cladodes by treatment and harvest were evaluated (two harvests, with an interval of 45 days between each one). The information was analyzed using fixed effects models and principal component analysis (PCA). The differences between treatments were determined by the least squares means test at $\alpha < 0.05$. **Results.** Treatment effect ($p < 0.001$) was found on physicochemical and phytochemical composition and morphology. The ether extract and total phenols were not affected by the treatment ($p > 0.05$). Dry matter (DM) was lower ($p < 0.05$) in the T4 (9.9%). PC showed higher values in the T1 ($p < 0.05$): 9.3%. Total flavonoids were higher ($p < 0.05$) in the T1 (1.29 mg EQ/g) and T4 (1.20 mg EQ/g). Antioxidant activity was lower ($p < 0.05$) in the T3 and T2: 11.9 and 12.3%, respectively. In morphology, T5 presented lower values ($p > 0.05$). The highest BP, according to the PCA, was observed in the T2 (24.1 kg/harvest) and, this BP was explained by two components ($p < 0.001$): Component 1 (PC, FC and, cladode width) and Component 2 (DM). **Implications.** The findings of this work serve as a basis for future research aimed at maximizing the production of nopal vegetables - grown in low-fertility and clayey soils - through biofertilization. **Conclusion.** Soil fertilization with bovine compost (T2) is a viable strategy to increase the CP of VN, due to the improvement of the physicochemical,

† Submitted July 2, 2024 – Accepted December 19, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5716>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = Ruy Ortiz-Rodríguez: <http://orcid.org/0000-0002-5226-5356>; Manuel Galvan-Aguilar: <http://orcid.org/0009-0000-1872-4486>; Manuel López-Rodríguez: <http://orcid.org/0000-0003-2895-7384>; Rosa E. Pérez-Sánchez: <http://orcid.org/0000-0001-6215-8653>; Alfonso Luna-Cruz: <http://orcid.org/0000-0002-1685-4401>; Gerardo Ordaz-Ochoa: <http://orcid.org/0000-0003-4502-3727>

phytochemical, and morphological indicators, which contribute to the increase in the BP of this nopal cultivated in clayey soils with low fertility.

Key words: cactus; fertilization; cladode; vegetable nutrition; chemical composition.

RESUMEN

Antecedentes. El nopal es una planta que se adapta a diversos agroecosistemas, sus características nutricionales y nutraceuticas la hacen de importancia para el consumo humano y animal; se requiere de nuevas estrategias para incrementar su producción y sus cualidades nutrimentales. **Objetivo.** Determinar el efecto de la biofertilización (inoculación de *Pseudomonas sp.*, *Enterobacter sp.* y *Paenibacillus sp.*) del cultivo de nopal verdura (NV; *O. ficus-indica*) sobre morfología, composición fisicoquímica y fitoquímica y su relación con la producción de biomasa (PB). **Metodología.** La investigación se realizó en una parcela con superficie de 750 m²; la cual se dividió en cuatro bloques; cada bloque con cinco tratamientos (n= 50 plantas de NV/tratamiento). Los tratamientos (T) fueron: T1, fertilizante químico; T2, composta de bovinos; T3, fertilizante químico más bioinoculante; T4, composta de bovino más bioinoculante y T5, Testigo (plantas sin fertilizante). Se evaluó la composición fisicoquímica y fitoquímica, morfología y proteína cruda (PC) de cladodios por tratamiento y cosecha (dos cosechas, con un intervalo de 45 días entre cada cosecha). La información se analizó por modelos de efectos fijos y análisis de componentes principales (ACP). Las diferencias entre tratamientos fue mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados a un $\alpha < 0.05$. **Resultados.** Se encontró efecto del tratamiento ($p < 0.001$) sobre la composición fisicoquímica y fitoquímica y morfología. El extracto etéreo y fenoles totales no fueron afectados por el tratamiento ($p > 0.05$). La materia seca (MS) fue menor ($p < 0.05$) con el T4 (9.9%). La PC mostró mayores valores con el T1 ($p < 0.05$): 9.3%. Los flavonoides totales fueron mayores ($p < 0.05$) con el T1 (1.29 mg EQ/g) y T4 (1.20 mg EQ/g). La actividad antioxidante fue menor ($p < 0.05$) con el T3 y T2: 11.9 y 12.3%, respectivamente. En morfología, el T5 presentó menores valores ($p > 0.05$). La mayor PB, de acuerdo con el ACP, se observó con el T2 (24.1 kg/cosecha) y esta PB se explicó con dos componentes ($p < 0.001$): Componente 1 (PC, FC y ancho del cladodio) y Componente 2 (MS). **Implicaciones.** Los hallazgos del presente trabajo sirven como base para futuras investigaciones orientados a maximizar la producción de nopal verdura -cultivado en suelos poco fértiles y arcillosos- mediante biofertilización. **Conclusión.** La fertilización con composta de bovino es la estrategia viable para incrementar la PB del NV, debido a la mejora de los indicadores fisicoquímico, fitoquímico y morfológico; mismos que contribuyen en el incremento de la PB de esta cactácea cultivada en suelos arcillosos con escasa fertilidad. **Palabras clave:** cactácea; fertilización; cladodio; nutrición vegetal; composición química.

INTRODUCCIÓN

El nopal verdura (*O. ficus-indica*) es una cactácea endémica de México (SADER, 2020). En el país, se encuentran al menos cien de las trecientas especies reconocidas a nivel global; de estas cien especies, entre diez y doce se comercializan para el consumo humano (Torres-Ponce-2015). No obstante, países como Estados Unidos, Perú, Chile, España, Italia, Marruecos, Etiopía, Argelia, Túnez, Sudáfrica, India, Egipto, Japón, Taiwán y Corea también son productores de nopal, aunque en menor medida que México (FAOSTAT, 2020); en donde el consumo *per cápita* de nopal verdura es de ≈ 6.7 kg, con tendencia al incremento (SIAP, 2023).

El interés por el cultivo de nopal en los países antes mencionados se debe principalmente a las características de esta cactácea: adaptabilidad a diferentes climas, bajas necesidades hídricas, propiedades nutraceuticas, incremento de esta cactácea en la alimentación humana (Quishpi, 2021) y animal (Ordaz *et al.*, 2019) y, como posible respuesta al cambio climático (sequías prolongadas) (FAO, 2018). Pero, lo más relevante, es que esta cactácea es un alimento de último recurso; puesto que su fotosíntesis especializada (metabolismo del ácido crasuláceo) permite a esta planta desarrollarse bajo condiciones

desérticas o incorporarlo a zonas no aptas para la agricultura (Jacobsen *et al.*, 2015)

Aun y cuando el nopal es una planta que se adapta a diversos agroecosistemas se requiere de estrategias para incrementar no solo su producción, sino también sus cualidades nutrimentales. Entre estas estrategias se encuentra la biofertilización, cuya finalidad es reconstituir el microbioma del suelo y mejorar la producción de biomasa de los cultivos (Flores *et al.*, 2021). Sin embargo, aún no se establece que variables (fisicoquímicas, fitoquímicas o morfológicas) post fertilización contribuye de manera directa en la producción de biomasa del nopal verdura bajo cultivos comerciales con suelos poco fértiles y arcillosos. Por ello, el objetivo fue determinar el efecto de la biofertilización (inoculación de *Pseudomonas sp.*, *Enterobacter sp.* y *Paenibacillus sp.*) del cultivo de nopal verdura (NV; *O. ficus-indica*) sobre morfología, composición fisicoquímica y fitoquímica y su relación con la producción de biomasa (PB).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en una parcela (750 m²) de nopal verdura ubicada en La Concepción, municipio de Morelia Michoacán, México., a una altitud de 2,150, en las coordenadas 19°42'N 101°18'O; clima

templado (16 a 19 °C) (INEGI, 2010) y con un suelo arcilloso (Tabla 1) (WRB, 2006). La densidad de plantación en dicha parcela fue 13,320 plantas/ha (distancia entre surcos: 1.5 m y entre plantas de 0.5 m).

El diseño experimental consistió en bloques al azar con cinco tratamientos/bloque y cuatro repeticiones (n= 50 plantas de nopal verdura (NV)/tratamiento) (Tabla 2). El diseño por bloques respondió a que el terreno de la parcela de estudio no fue nivelado por el productor antes de implementar el cultivo del NV. Para el logro

del objetivo se realizaron dos cosechas de cladodios con un intervalo de 45 días entre cada cosecha.

En los cuatro bloques se realizaron las mismas prácticas culturales utilizadas por los productores de la región: control de arvenses y poda. El riego de las plantas fue por goteo. En cada bloque y tratamiento se evaluaron las características fisicoquímicas, fitoquímicas, morfológicas y la producción de biomasa/corte. Para el análisis fisicoquímico y fitoquímicos, se utilizaron 60 cladodios (5.100 kg) de NV en base fresca (BF) por tratamiento y cosecha.

Tabla 1. Composición físico- química (promedio $\pm$ DE) del suelo de la parcela de nopal verdura evaluada.

P ^d Físicos	Promedio	Micronutrientes	mg/kg de suelo
PH1:2 (H ₂ O)	4.7 $\pm$ 0.2	Fe ²⁺	42.5 $\pm$ 14.9
CE1:2(H ₂ O) (mS/cm)	0.1 $\pm$ 0.02	Zn ²⁺	0.1 $\pm$ 0.08
CEES (mS/cm)	0.1 $\pm$ 0.02	Cu ²⁺	0.2 $\pm$ 0.1
M. Orgánica%	3.2 $\pm$ 0.6	Mn ²⁺	31.93 $\pm$ 6.9
Textura	Arcilloso	B ³⁺	8.5 $\pm$ 17.3
Arcilla%	78.3 $\pm$ 5.4	Aniones	
Arena%	7.4 $\pm$ 5.5	CO ₃ ²⁻	0.0
Limo%	14.2 $\pm$ 2.6	HCO ₃ ⁻	23.9 $\pm$ 3.4
DAS(g/cm ³)	0.9 $\pm$ 0.03	CL ⁻	36.1 $\pm$ 3.5
NN (ppm, mg/kg)	6.8 $\pm$ 0.97	SO ₄ ²⁻	56.2 $\pm$ 12.2
		P	7.7 $\pm$ 2.2
		Cationes	
		Na ⁺	17.9 $\pm$ 8.3
		K ⁺	132.3 $\pm$ 42.4
		Ca ²⁺	612.2 $\pm$ 135. 8
		Mg ²⁺	332.9 $\pm$ 140.4
		Al ³⁺	200.5 $\pm$ 81.1
		H ⁺	188.3 $\pm$ 90.1
		CIC	26.8 $\pm$ 9.2

d =Parámetros; DE = Desviación estándar; CE= Conductividad eléctrica; CEES= Conductividad eléctrica del extracto de saturación; DAS= Densidad Aparente del Suelo; NN= Nitrógeno nítrico; CIC= capacidad de intercambio catiónico; Fe²⁺= Fierro; Zn²⁺= Zinc; Cu²⁺= Cobre; Mn²⁺= Manganeso; B³⁺= Boro; CO₃²⁻= Carbonatos; HCO₃⁻= Bicarbonatos; CL⁻= Cloruros; SO₄²⁻= Sulfatos; Bray= Fosforo; Na⁺= Sodio; K⁺= Potasio; Ca²⁺= Calcio; Mg²⁺= magnesio; Al³⁺= Aluminio; H⁺= Acidez; C= Capacidad; IC= Índice catiónico.

Tabla 2. Tratamientos de fertilización del nopal verdura (*O. ficus-indica*) por bloque.

Tratamiento	Componente	Suministro/planta
T1 (Fertilizante Químico)	Nitrato de calcio (10.75 g) + sulfato de potasio (3.0g) + fosfato diamónico (18.25 g) + urea (19.25 g) + nitrato de magnesio (0.35 g)	51.6 g
T2 (Composta de bovino)	Materia orgánica	5 kg
T3 (Fertilizante químico más bioinoculante)	Fertilizante químico (T1) más bioinoculante: <i>Pseudomonas fluorescens</i> C13; <i>Pseudomonas fluorescens</i> C30; <i>Pseudomonas putida</i> ACJ-14; <i>Enterobacter Cloacae</i> G50-78 y <i>Paenibacillus</i> (<i>Paenibacillus Polymyxa</i> LAD-07)	51.6 g (Químico) + 200mL (1x10 ⁷ UFC mL ⁻¹)
T4 (Composta de bovino más bioinoculante)	Composta de bovino (T2) más bioinoculante	5 kg (Composta) + 200mL (1x10 ⁷ UFC mL ⁻¹)
T5 (Testigo)	Sin fertilización química u orgánica o bioinoculante	0.0

Una vez cosechados los cladodios a utilizar en las determinaciones fisicoquímicas, estos fueron llevados al Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimento (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH, en donde se lavaron con agua potable y se desinfectaron con hipoclorito de sodio (NaClO) al 3% por 10 minutos y se dejaron secar. Posteriormente, se utilizaron 60 cladodios (84.2 g/cladodio en promedio) seleccionados al azar; es decir, tres cladodios seleccionados aleatoriamente/tratamiento/bloque). De cada cladodio se obtuvieron dos muestras en BF: 2 y 10 g, para la primera y segunda muestra. La primera muestra fue para la determinación de humedad (Hum) y materia seca (MS) y la segunda muestra para la elaboración de extractos etanólico para la determinación fitoquímica. El resto de cada cladodio (≥ 72.2 g/cladodio) se utilizó para la determinación fisicoquímica.

Variables fisicoquímicas

Las variables consideradas para el análisis fisicoquímico en esta investigación fueron: humedad (Hum), materia seca (MS), fibra cruda (FC), extracto etéreo (EE), proteína cruda (PC), extracto libre de nitrógeno (ELN) y cenizas (CEN). Para su determinación se utilizaron las técnicas estandarizadas y descritas por la AOAC, (2002). En este sentido, para la determinación de Hum (método 930.15) y materia seca (MS) se utilizaron 2.0 g de cladodio en BF/tratamiento/bloque, las cuales se sometieron a deshidratación a 105 °C durante 4 h, pasado este tiempo se determinó el porcentaje de Hum mediante el peso de la muestra en BF menos el peso en base seca (BS). Para la determinación de PC (método 984.13) se utilizó una muestra de 0.7 g de cladodio en BS/tratamiento/bloque; muestras que se sometieron al método kjeldhal. El EE (método 920.39) se determinó utilizando 2 g de cladodio en BS/tratamiento/bloque; muestras que fueran procesadas mediante el método de extracción con éter; para ello, se utilizó un equipo soxhlet durante 4 h. Para el caso de la determinación de FC (método 962.09) se utilizaron 2 g de cladodio en BS/tratamiento/bloque, muestras que sometieron al método de hidrólisis ácida y alcalina. Las CEN (método 942.05) se determinaron utilizando 2 g de cladodio en BS/tratamiento/bloque; muestras que se sometieron al método de incineración en mufla a 550 °C por 3 h. Finalmente, la determinación de ELN (carbohidratos solubles) se determinó mediante la siguiente fórmula: $ELN = 100 - (FC + PC + EE)$.

Variables fitoquímicas

En el caso de las variables consideradas en el análisis fitoquímico, estas fueron flavonoides totales (FLAV), fenoles totales (FEN) y capacidad de absorbancia de radicales de oxígeno (ORAC, siglas en inglés) o

actividad antioxidante. Para la determinación de dichas variables se utilizaron 10 g de cladodio en BF/tratamiento/bloque para la preparación de extractos etanólicos, los cuales fueron preparados mediante la metodología modificada de Faraz *et al.* (2020); modificación hecha a la metodología de propuestas Stalikas (2007). Para ello, se utilizaron frascos color ámbar en donde se pusieron en contacto con las muestras (10.0 g/muestra) maceradas de cladodio en BF/tratamiento/bloque en 100 mL de alcohol al 96%, el contacto de las muestras con el alcohol fue de 24 h y en oscuridad. Posterior a dicho periodo, se filtró en oscuridad la fracción sólida de las muestras con papel filtro de poro cerrado y la porción líquida de las muestras se utilizó para cuantificar FEN y FLAV y ORAC.

Los FEN se determinaron mediante la metodología propuesta por Camarena *et al.* (2018), en donde la absorbancia utilizada fue de 750 nm en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, Perkin Elmer®, Inc., Waltham, MA, EE. UU). Los resultados de FEN se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico/g de extracto (mg EAG/g). En cuanto a la cuantificación de FLAV, esta se realizó mediante la metodología propuesta por Camarena *et al.* (2018). Para esta cuantificación se utilizaron 1400 µL del extracto, 600 µL CH₃OH y 600 µL de cloruro de aluminio, las cuales se depositaron en un tubo de ensayo en donde permanecieron en reposo de 30 minutos. Inmediatamente después se cuantificaron los FLAV a una absorbancia de 415 nm en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.); para ello, se utilizó la curva de calibración de quercetina a 0 - 30 µg. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de quercetina/g de extracto (mg EQ/g).

Finalmente, en la determinación de ORAC se utilizó el método descrito por Camarena *et al.* (2018). Para ello, se diluyó el reactivo 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH) con CH₃OH a una concentración de 6×10^{-5} M. Para la cuantificación se incorporaron 100 µL de extracto y 1900 µL de solución de DPPH en un tubo de ensayo a temperatura ambiente y en oscuridad durante 15 minutos para su posterior medición a una absorbancia de 515 nm en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Los resultados se expresaron en % de ORAC.

Variables morfológicas

Las variables consideradas en el análisis morfológico fueron el largo (cm), ancho (cm), grosor (mm) y peso (g) del cladodio. Para las determinaciones de dichas variables se utilizaron los cladodios cosechados para los análisis fisicoquímico y fitoquímico. El largo y ancho del cladodio se midieron con una regla de

plástico graduada en cm y mL, mientras que para determinar el grosor del cladodio se utilizó un vernier digital (LEIDSANY®). El peso del cladodio se determinó con una báscula digital® de alta precisión con capacidad de 5 kg.

Biomasa en BF

La producción de biomasa (kg) producida en BF/cosecha/tratamiento/bloque se determinó pesando la cantidad total de cladodios cosechados. El pesaje se realizó con una báscula digital® con capacidad de 40 kg y una precisión de 0.05 g.

Análisis de datos

La información recabada se analizó a través de modelos de efectos fijos, análisis de componentes principales (ACP) y mediante correlaciones de Pearson y de omega cuadrado de Hays (ω^2). Para el primer y tercer caso, los datos se evaluaron usando SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA), las diferencias entre tratamientos se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans, siglas en inglés) a un $\alpha < 0.05$. El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + T_j + C_k + T(B)_{j(k)} + e_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} = Variable respuesta: Hm, MS, FC, CEN, PC, EE, ELN, FLAV, FEN, ORAC, Peso, Largo, Ancho, Grosor y Biomasa;

μ = Promedio general;

B_i = Efecto fijo del i -ésimo bloque con $i = 1, 2, 3$ y 4 ;

T_j = Efecto fijo del j -ésimo tratamiento con $j = \text{FQ, CB, FQ+I, CB+I, y testigo}$;

C_k = Efecto fijo del k -ésimo corte del cladodio con $k = 1$ y 2 ;

$T(B)_{jk}$ = Efecto fijo de la anidación del j -ésimo tratamiento dentro del i -ésimo bloque;

e_{ijkl} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim \text{NID}=0, \sigma^2e$).

El análisis estadístico (ACP) se realizó para establecer la relación de las variables fisicoquímicas, fitoquímicas y morfológicas con la producción de biomasa del nopal verdura; eje de investigación que se ejecutó en dos etapas utilizando el software IBM SPSS Versión 25.0 (2017) (IBM Corp., Armonk, NY, USA). En la primera etapa, el ACP fue con independencia del tratamiento utilizado; la segunda etapa, el ACP fue por tratamiento. Las pruebas utilizadas en ambas etapas fueron: Káiser, Meyer y Olkin (KMO), esfericidad de Bartlett, prueba de rotación con la normalización de Varimax y prueba de Durbin-Watson (Gallego y Araque, 2019). La elección de los indicadores por componente fue con autovalores (eigenvalor) ≥ 0.70 ;

la estimación de la producción de biomas/tratamiento se determinó con los coeficientes de la regresión lineal múltiple generados a partir de las puntuaciones factoriales (Navarro *et al.*, 2010)

RESULTADOS

No se encontró efecto ($p > 0.05$) de bloque sobre MS, PC, FEN, variables morfológica y biomasa; el resto de las variables analizadas sí fueron afectadas por dicho factor ($p < 0.001$). Para el caso del tiempo entre cosecha y cosecha de los cladodios (dos cosechas), este no afectó las variables de MS, ancho y grosor del cladodio ($p > 0.05$); pero, si al resto de las variables evaluadas ($p < 0.001$) (Tabla 3). Referente al tratamiento, se encontró efecto ($p < 0.05$) sobre la mayoría de las variables analizadas, excepto a EE y fenoles totales ($p > 0.05$; Tabla 3). Con respecto a la anidación tratamiento (bloque) no se encontró efecto sobre las variables morfológicas, biomasa y PC ($p > 0.05$), pero si afectó ($p < 0.001$) a: MS, FC, CEN, ELN, FEN, FLAV y ORAC (Tabla 3).

En cuanto a los resultados del análisis fisicoquímico (Tabla 4), se encontró en MS que T1, T2, T3 y T5 mostraron valores mayores ($p < 0.05$) ($\leq 11.3\%$) en comparación con el T4 (9.9%). En relación con PC, los cladodios de T1 presento el valor mayor: 9.3% y diferente ($p < 0.05$) a T2, T3, T4 y T5; no obstante, T5 (5.6%) fue el tratamiento con menor ($p < 0.05$) promedio en PC. Para el caso de la FC, los valores mayores se observaron en el T3 (8.8%) y T4 (9.2%) presentaron valores iguales entre sí ($p > 0.05$); pero, diferentes ($p > 0.05$) con los promedios del T1, T2 y T5, todos similares ($p < 0.05$), (valores de FC $\leq 8.3\%$). Con respecto a EE, no se observaron diferencias ($p > 0.05$) entre los cinco tratamientos evaluados; cuyos promedios oscilaron entre 2.3 a 2.9%. En el caso de las CEN, T3 presento la menor ($p < 0.05$) cantidad (17.3%) en comparación con el resto de los tratamientos. Sin embargo, el T2 y T4 mostraron valores de CEN similares ($p > 0.05$) entre sí; pero, mayores ($p < 0.05$) a T1 (19.3%) y T5 (19.9%). Finalmente, el ELN en T3 y T5 se observaron valores similares ($p > 0.05$) entre sí: 62.9 y 63.4%, respectivamente; sin embargo, valores que fueron mayores ($p < 0.05$) a T1, T2 y T4.

En relación con los resultados del análisis fitoquímico (Tabla 4), los valores de FEN contenidos en el NV fueron iguales ($p > 0.05$) en todos los tratamientos evaluados: entre 0.51 a 0.61 mg EAG/g. Mientras que los FLAV fueron similares ($p > 0.05$) en T1 (1.29 mg EQ/g), T2 (1.17 mg EQ/g) y T4 (1.20 mg EQ/g); pero, mayor ($p < 0.05$) a T3 y T5. En lo que respecta a ORAC, T1, T2, T4 y T5 presentaron mayores valores (12.3 a 14%) con respecto a T3 ($p < 0.05$); pero, T3 (11.9%) presento valor similar ($p > 0.05$) a T2 (12.3%).

Tabla 3. Análisis de efectos fijos para las variables fisicoquímicas, fitoquímicas, morfológicas y biomasa.

Efecto	MS	PC	FC	EE	CEN	ELN	FEN	FLA	ORAC	Peso	Lar	An	Gro	Bio
Bloque	NS	NS	**	**	**	**	NS	**	**	NS	NS	NS	NS	NS
Corte	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	NS	NS	**
Tratamiento	**	**	**	NS	**	**	*	**	*	*	**	**	**	**
Tratamiento(Bloque)	*	NS	**	**	**	**	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS

MS=Materia seca; PC=proteína cruda; EE=Extracto etéreo; CEN=Cenizas; ELN=Extracto libre de nitrógeno; FEN=Fenoles; FLA=Flavonoides; ORAC=Actividad antioxidante; Lar=Largo; An=Ancho; Gro=Grosor; Bio=Biomasa

NS=No significativo ($p>0.05$); *=Significativo ($p<0.05$); **= Altamente significativo ($p<0.001$)

Tabla 4. Medias de mínimos cuadrados ($\pm$ error estándar) para las variables fisicoquímicas, fitoquímicas, morfológicas y producción de biomas del nopal verdura de acuerdo con el tratamiento.

Variable	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	$\pm$ EE
Análisis químico proximal						
Materia seca (%)	10.7 ^a	11.1 ^a	10.7 ^a	9.9 ^b	11.3 ^a	0.25
Proteína cruda (%)	9.3 ^a	7.4 ^c	8.4 ^b	7.5 ^c	5.6 ^d	0.32
Fibra cruda (%)	7.9 ^b	8.3 ^b	8.8 ^a	9.2 ^a	8.2 ^b	0.36
Extracto etéreo (%)	2.8 ^a	2.9 ^a	2.5 ^a	2.3 ^a	2.7 ^a	0.30
Extracto libre de nitrógeno (%)	60.6 ^b	59.0 ^c	62.9 ^a	59.3 ^c	63.4 ^a	0.58
Cenizas (%)	19.3 ^b	22.3 ^a	17.3 ^c	21.6 ^a	19.9 ^b	0.48
Fitoquímicas						
Fenoles totales (mg EAG/g)	0.60 ^a	0.56 ^a	0.56 ^a	0.61 ^a	0.57 ^a	0.02
Flavonoides (mg EQ/g)	1.29 ^a	1.17 ^a	1.05 ^b	1.20 ^a	1.07 ^b	0.09
ORAC (%)	13.6 ^a	12.3 ^{ab}	11.9 ^b	14.0 ^a	13.8 ^a	1.11
Morfológicas						
Peso (g)	83.9 ^b	88.7 ^a	83.9 ^b	89.3 ^a	74.8 ^c	0.84
Largo (cm)	22.9 ^a	22.8 ^a	21.6 ^c	22.3 ^b	19.2 ^d	0.16
Ancho (cm)	8.8 ^a	8.4 ^b	8.4 ^b	8.5 ^b	7.6 ^c	0.03
Grosor (mL)	6.5 ^c	6.6 ^b	6.6 ^b	6.5 ^c	6.8 ^a	0.03
Biomasa (kg)	22.8 ^b	25.0 ^a	22.7 ^b	18.8 ^c	15.8 ^d	1.09

T1= Fertilizante químico; T2= Composta de bovino; T3= Fertilizante químico más bioinoculante; T4= Composta de bovino más bioinoculante; T5= Testigo; MS= Materia seca; ORAC= Actividad antioxidante (capacidad de absorción de radicales de oxígeno).

En morfología de los cladodios analizados (Tabla 4), se encontró que T5 fue el que presentó cladodios con menor ($p<0.05$) largo (19.2 cm), ancho (7.6 cm) y peso (74.8 g) vs. el resto de los tratamientos analizados; excepto en grosor (6.8 mm), en esta variable T5 fue mayor ($p<0.05$) al resto de los tratamientos (≤ 6.6 mm). En el peso (g) del cladodio, este fue mayor ($p<0.05$) en T2 (88.7 g) y T4 (89.3 g), ambos promedios similares ($p>0.05$) entre sí. Mientras que el menor ($p>0.05$) peso se observó en T5 (74.8 g). Finalmente, la biomasa producida en BF/tratamiento fue mayor ($p<0.05$) en T2 (25.0 kg/cosecha) respecto al resto de los tratamientos evaluados; la menor ($p<0.05$) producción de biomasa en BF se encontró en T5 (15.8 kg/cosecha) (Tabla 4).

Análisis de la biomasa del nopal verdura mediante ACP independientemente del tratamiento

El ACP determinó que cuatro componentes explican el 78.4% de la variabilidad total de la biomasa producida por el nopal verdura ($p<0.001$) independientemente del tratamiento (fertilización) que se le aplicó (Tabla 5). Los cuatro componentes obtenidos a través del ACP estuvieron conformados por ocho variables (Tabla 5).

De acuerdo con los estimadores de la regresión (Tabla 6) se determinó que la biomasa producida por cada 50 plantas de nopal verdura en la parcela evaluada sería de 29.419 kg en BF/cosecha o 3.14 kg en BS/cosecha, independientemente del tratamiento utilizado.

Tabla 5. Análisis de componentes principales (ACP) para la determinación de la biomasa producida por el nopal verdura (*O. ficus-indica*) independientemente del tipo de fertilizante (tratamiento) aplicado.

ACP			Regresión		
Componentes	VE	KMO	Gl	CM	R ²
4	78.4	0.707**	4	887.201**	0.87
					DW
					1.9

Matriz de componente (C) rotado

Variable	Componente			
	C1	C2	C3	C4
Actividad antioxidante	0.919			
Fenoles	0.811			
Cladodios/corte	0.935			
Largo (cm)		0.851		
Ancho (cm)		0.913		
Tratamiento		-0.917		
Extracto etéreo			0.812	
Materia seca				0.952

VE= varianza explicada; KMO= Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin; CM= cuadrados medios; Gl= grados de libertad; DW= Prueba de Durbin-Watson;

** = Altamente significativo

Método de extracción: análisis de componentes principales. Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.

Tabla 6. Coeficientes de regresión múltiple por componente para la predicción de biomasa (Kg) de nopal verdura (*O. ficus-indica*).

Modelo	Coeficientes		
	β	T	Sig.
Constante	21.036	74.831	0.000
Componente 1 “Antioxidantes/producción”	4.563	16.164	0.000
Componente 2 “Morfología/tratamiento”	2.834	10.038	0.000
Componente 3 “Energía”	-0.040	-0.140	0.889
Componente 4 “Sólidos”	0.986	3.494	0.001
Biomasa	29.419 kg		

Análisis de la biomasa del nopal verdura mediante ACP de acuerdo con el tratamiento

Se encontró que T1 y T2 produjeron mayor producción de biomasa en BF (24.1 y 23.8 kg/ cosecha, respectivamente), con 81.8 y 75.2% de varianza explicada, respectivamente (Tabla 7). En el caso del T1, la producción de biomasa se explicó con un Componente ($p < 0.001$) constituido por: PC, FC, EE y FLAV; mientras que dicha producción en T2, se explicó con dos componentes ($p < 0.001$): Componente 1, conformado por PC, FC y ancho del cladodio y Componente 2, conformado solo por MS. (Tabla 7). En los tratamientos con menor producción de biomasa (T4 y T5) se observó que la menor biomasa se asoció al Componente 1 de cada tratamiento ($p < 0.001$) y en los cuales, sus coeficientes (β_1) fueron negativos: -4.54 y -4.88 kg de biomasa en BF, para T4 y T5, respectivamente (Tabla 7).

DISCUSIÓN

Por lo general, los suelos presentan heterogeneidad en su constitución física, química y biológica de manera natural o bien debido a ineficientes o inadecuadas prácticas agronómicas (Calderón-Medina *et al.*, 2018) y, ello, afecta la productividad de las plantas; p. ej., la compactación del suelo restringe el enraizamiento y disminuye la absorción de agua y nutrientes evitando el desarrollo normal de la planta (Moreno-Roblero *et al.*, 2020). Además, al variar la composición química del suelo dentro de la misma superficie del cultivo, se modifican las bases de cambio (K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) y se afecta la morfología de las plantas y los valores de MS (Rolón y Causarano, 2000). Aspectos que explicarían en parte el efecto de bloque y la anidación tratamiento(bloque) sobre las variables analizadas en esta investigación.

Tabla 7. Análisis de componentes (C) principales para la determinación de biomasa del nopal verdura (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento (fertilización).

Tratamientos									
	T1	T2		T3		T4		T5	
VE	75.2	81.8		79.9		74.4		82.3	
KMO**	0.82	0.74		0.71		0.70		0.70	
Componentes									
Variable	C1	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Materia seca	--	--	0.97	--	-0.72	--	--	--	--
Proteína cruda	0.96	0.83	--	0.90	--	--	0.94	--	0.99
Fibra cruda	0.90	0.87	--	0.78	--	--	--	0.86	--
Extracto etéreo	0.76	--	--	--	--	--	--	--	--
Flavonoides	0.97	0.85	--	0.74	--	0.91	--	0.85	--
ORAC	--	--	--	--	--	--	--	-0.91	--
Ancho	--	0.91	--	0.96	--	--	--	--	--
ANOVA ^{&}									
R ²	0.57	0.28		0.18		0.69		0.71	
Durbin-Watson	1.7	1.8		1.7		1.9		1.9	
Coeficientes de Regresión									
β ₀	23.6**	21.7**		21.3**		21.5**		20.1**	
Componente	β ₁								
1	0.23**	0.80*		0.401*		-4.54**		-4.88**	
2	--	1.56**		0.043 ^{NS}		2.12**		0.33**	
Biomasa (kg)	23.8	24.1		21.7		19.1		15.6	

VE=Varianza Explicada; KMO=Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin T1= Fertilizante químico; T2= Composta de bovino; T3= Fertilizante químico más bioinoculante; T4= Composta de bovino más bioinoculante; T5= Testigo; ORAC= capacidad de absorción de radicales de oxígeno

[&]= p<0.001; **= Altamente significativo (p<0.001) *=Significativo (p<0.05); NS=No significativo (p>0.05)

Chávez-Díaz *et al.* (2020) y Flores *et al.* (2021), establecen que los fertilizantes tienen la capacidad de reconstituir el microbioma del suelo, mejorando la productividad de biomasa de los cultivos. Resultados que se aprecian mejor con los fertilizantes orgánicos en comparación con la fertilización química y en donde los fertilizantes orgánicos (compostas de estiércol de animales domésticos) provocan mejoras en la morfología de las plantas (mayores dimensiones) y la producción de biomasa o frutos; ello, como consecuencia del aporte y disponibilidad de nutrientes y sustancias estimulantes del crecimiento que este tipo de fertilizantes aportan, incluso en condiciones de suelos degradados (Mogollón *et al.*, 2016). Aspectos que se observaron en la presente investigación. Sin embargo, existen otros factores que afectan la composición fisicoquímica, fitoquímica y productividad, de las plantas -incluidas las cactáceas-, tales como: época de cosecha, edad del cladodio, tipo de la parcela, humedad, temperatura, luz y factores edáficos (Pérez *et al.*, 2015); no obstante, la época de cosecha, temperatura y fotoperiodo no fueron considerados en esta investigación.

En la nutrición de los suelos y el funcionamiento del ecosistema de los cultivos, los microorganismos del suelo desempeñan un papel importante, puesto que estos están en estrecha relación con las plantas (García-Palacios *et al.* 2016). Pero, el tipo y cantidad del microbiota del suelo depende de la cantidad y calidad de la materia orgánica presente o incorporada al suelo y a las características de este (Delgado *et al.*, 2016). Aspecto con posible influencia en los resultados de los tratamientos compuestos con fertilizantes químicos u orgánicos más la inoculación de bacterias (T3 y T4, respectivamente), mismos que no superaron en biomasa producida a la fertilización únicamente con materia orgánica (T2). Sin embargo, las mejoras de ciertas variables fisicoquímicas, fitoquímicas y morfológicas del nopal verdura por efecto de la fertilización no es suficiente para explicar con claridad -mediante el análisis estadístico de efectos fijos- el incremento de la biomasa de esta cactácea; por ello, se planteó la siguiente pregunta: ¿qué elementos fisicoquímicos, fitoquímicos o morfológicos de la planta se relacionan con una mayor producción de

biomasa de nopal verdura post-fertilización? En esta investigación, la respuesta se encontraría en función de los resultados del análisis de componentes principales (ACP) (Tablas 5, 6 y 7), mismos que se discuten a continuación.

Análisis de la biomasa del nopal verdura mediante ACP independientemente del tratamiento

El primer ACP, el cual se realizó con independencia del tratamiento (Tablas 5 y 6), determinó que el tipo de fertilizante utilizado (Componente 2) es elemento clave en los cambios de la producción de biomasa. Aspecto que determina que sin la fertilización o una inadecuada combinación de esta evita mejoras en la morfología del nopal (largo y ancho) y, en consecuencia, en la biomasa. Aspecto que se corroboró con los resultados de las asociaciones (ω^2 y r) entre el tratamiento (T) - largo ($\omega^2 = 0.27$; $p < 0.01$), T - ancho ($\omega^2 = 0.75$, $p < 0.01$), T - grueso ($\omega^2 = 0.22$; $p < 0.01$) y T - biomasa ($\omega^2 = 0.25$; $p < 0.01$) y entre biomasa (Bio) -alto ($r = 0.32$; $p < 0.01$), Bio - ancho ($r = -0.18$; $p = 0.08$) y Bio - grueso (0.13 ; $p = 0.21$).

Para el caso del Componente 1 (FEN, ORAC y cladodios/ cosecha) y su contribución en la biomasa en BF (Tabla 6), se ha establecido que, la actividad antioxidante beneficia la fotosíntesis, la asimilación de nutrientes, la síntesis proteica y la actividad enzimática de las plantas (Lu *et al.*, 2015). Mientras que la edad del cladodio al momento de la cosecha propicia tanto el peso del cladodio como la biomasa producida. En México, el corte del cladodio se realiza a una edad de entre 30-35 días con un cladodio para su venta de entre 100 a 150 g. Si no se cumplen estas expectativas, el cladodio no se cosecha o se descarta, debido al crecimiento desigual de los cladodios del nopal verdura provocado por: condiciones de cultivo, precipitación pluvial o época de cosecha (Maki-Díaz *et al.*, 2015). En este sentido, las variables morfológicas sí determinan la variación del peso de los nopales al momento de la cosecha (Bacarrillo-López *et al.*, 2021).

En lo que respecta al Componente 3 (EE), este no fue significativo ($p = 0.889$) para la producción de biomasa en BF (Tabla 6). Resultado similar con lo obtenidos por Boudet *et al.* (2017), estos investigadores sugieren que la aplicación de los fertilizantes orgánicos e inorgánicos no son un factor clave en la producción de algunos nutrientes en ciertos cultivos; p. ej., en el nopal, es en las espinas y en las raíces en donde se produce la grasa y, el incremento o decremento de esta se relaciona con la edad de la planta y las condiciones ambientales (luz y temperatura). Además, en esta cactácea, la grasa no es un factor clave en la producción de cladodios, debido a que estos contienen poca grasa (Rives-Castillo *et al.*, 2021; Ramírez-Castaño *et al.*, 2023)

Finalmente, la MS (Componente 4) contribuyó ($p < 0.001$) con 986 g de biomasa en BF (Tabla 6). Esto se relaciona con el genotipo de las plantas, prácticas agronómicas, elementos del clima y tiempo de exposición lumínica (fotosíntesis), puesto que, a mayor tiempo de exposición, mayor producción de MS (Escalante-Estrada *et al.*, 2014). Las cactáceas poseen un metabolismo adaptado a ambientes con poca precipitación y suelos pobres y, en consecuencia, poseen menor MS; puesto que, almacenan mayor cantidad de agua vs. plantas adaptadas a zonas con mayor precipitación y mejores condiciones edáficas (Bautista-Zamora *et al.*, 2017).

Análisis de la biomasa del nopal verdura mediante ACP de acuerdo con el tratamiento

Los resultados del ACP de acuerdo con cada tratamiento evaluado en esta investigación y su relación con la biomasa de nopal verdura (Tabla 7), demuestran que el T2 mostró mejor comportamiento en producción de biomasa, aspecto que pudo deberse, no solo por la mejora de los nutrientes del suelo al ser fijados provisionalmente, sino también, por el mejoramiento de la estructura del suelo, reducción de la erosión de este, regulación de la temperatura del suelo y almacenamiento de más humedad. Además, son fuente de alimento para los organismos del suelo y suprimen las enfermedades edáficas (Cantero-Flores *et al.*, 2016). Aspectos que se reflejaron en las estructuras sólidas como lo es la FC y el ancho del cladodio, así como en la formación de PC y MS (Componente 1 y 2) (Tabla 7).

Aun y cuando en el T1 y T3 incrementaron los valores de biomasa producida, estos fueron menores al T2 (Tabla 7), puesto que, este tipo de fertilizantes (inorgánicos) modifican o alteran la estructura del suelo, afectando directamente en la productividad y sanidad de la planta; Zhu *et al.* (2018), establecen que el uso de fertilizantes químicos (nitrogenados) pueden provocar la acidificación del suelo, la cual reduce la disponibilidad de nutrientes, limitando el crecimiento y desarrollo de la planta, aunado a ello, se puede incrementar la solubilidad de metales tóxicos, que son perjudiciales para las raíces de las plantas y son capaces de inhibir la absorción de agua y nutrientes (Prieto-Méndez *et al.*, 2009; Rodríguez-Eugenio *et al.*, 2019). Aunado a lo anterior, dicha fertilización, pudo provocar un desequilibrio biológico, reduciendo las poblaciones bacterianas e impactando directamente en la producción de biomasa (Muniz *et al.*, 2022).

Por último, en los tratamientos (T3 y T4) donde se adicionaron bacterias (*Pseudomonas* sp., *Enterobacter* sp. y *Paenibacillus* sp.) al fertilizante, no se observó respuesta positiva en la producción de biomasa. Para Ortiz-Texon *et al.* (2016), las bacterias incorporadas junto con los fertilizantes químicos u orgánicos deben

incrementar la síntesis de fitohormonas, la producción de sideróforos, la solubilización de minerales y la fijación del nitrógeno atmosférico (Rives y Hernández, 2007). Por lo que es posible que, en estos tratamientos, existió competencia por nutrientes entre las bacterias y la planta o competencia entre las bacterias inoculadas con las bacterias autóctonas del suelo (Montaño y Sánchez-Yáñez, 2014) o muerte de las bacterias inoculadas por condiciones ambientales inadecuadas como el pH (6-8), la temperatura (10-45 °C) y la humedad (abundante) al momento de mezclarse con el suelo (Castro-Sowinski *et al.*, 2007; Reyes-Reyes *et al.*, 2018), puesto que, temperaturas fuera del rango fomentan la desnaturalización e inhibición de la acción de las enzimas dentro de la células (Cervantes-Martínez *et al.*, 2017; Jiménez-Delgadillo *et al.*, 2018).

CONCLUSIÓN

En el cultivo del nopal verdura en suelos arcillosos, independientemente del fertilizante utilizado, la producción de biomasa está influenciada por el contenido de fenoles totales, la actividad antioxidante y la edad del cladodio al momento de la cosecha. Sin embargo, el enriquecimiento del suelo arcilloso mediante la biofertilización con *Pseudomonas*, *Enterobacter* y *Paenibacillus* en combinación con fertilizante químicos u orgánico (composta de bovinos) no fue una opción viable para el incremento de la biomasa del nopal verdura bajo las condiciones de esta investigación; puesto que, dicha combinación requiere del control de otros factores (humedad del suelo y nutrientes para las bacterias) para hacer posible el desarrollo del bioinoculante y se refleje en la producción de esta cactácea. Por lo que, la estrategia más viable, para una mayor producción de biomasa del nopal verdura en suelos arcillosos, es la fertilización del suelo con composta de bovinos, debido a que este fertilizante mejora las características fisicoquímicas, fitoquímicas y morfológicas de los cladodios y, en consecuencia, estas características son las responsables del incremento de la producción de cladodios de este tipo de nopal.

Acknowledgements

The research was funded by the Institute of Science, Technology and Innovation of the State of Michoacán (project number PICIR-070).

Funding: This manuscript is a product of the project "Soil fertility efficiency through agroecological practices to increase the biomass and nutritional quality of the nopal vegetable produced in the Concepción municipality of Morelia, Michoacán, Mexico." It was approved by the Institute of Science, Technology and Innovation of the State of Michoacán with number PICIR-070.

Conflict of interest: The authors declare that there are no conflicts of interest regarding this manuscript.

Compliance with ethical standards: Due to the nature of the study this does not apply.

Data availability: Data is available upon reasonable request with the corresponding author rosa.perez@umich.mx

Author contribution statement (CRediT): **R. Ortiz-Rodríguez** – Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Writing – original draft., **M. Galvan-Aguilar** – Data curation, Investigation, Methodology, Writing – review & editing., **M. López-Rodríguez** – Writing – original draft., **R.E. Pérez-Sánchez** – Project administration, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Writing – original draft., **A. Luna-Cruz** – Investigation, Methodology, Writing – original draft., **G. Ordaz-Ochoa** – Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Writing – original draft .

REFERENCES

- AOAC., 2002. Official methods of analysis. 17th ed. Arlington, VA, USA: Association of Official Analytical Chemists. www.aoac.org
- Bacarrillo-López, R., Pedroza-Sandoval, A., Inzunza-Ibarra, M.A., Flores-Hernández, A. and Macías-Rodríguez, F.J., 2021. Productividad de forraje de variedades de nopal (*Opuntia spp.*) bajo diferentes regímenes de humedad del suelo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3), pp. 2-8. <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.2878>
- Bautista-Zamora, D., Chavarro-Rodríguez, C., Cáceres-Zambrano, J. and Buitrago-Mora, S., 2017. Efecto de la fertilización edáfica en el crecimiento y desarrollo de *Phaseolus vulgaris* cv. ICA Cerinza. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), pp. 122-132. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5496>
- Boudet, A.A., Boicet, F.T., Durán, S.R. and Meriño, H.Y., 2017. Efecto sobre el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de diferentes dosis de abono orgánico bocashi en condiciones agroecológicas. *Centro Agrícola*, 44(4), pp. 37-42. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_artt_ext&pid=S0253-57852017000400006&lng=es&tlng=es

- Calderón-Medina, C.L., Bautista-Mantilla, G.P. and Rojas-González, S., 2018. Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *ORINOQUIA*, 22(2), pp.141-157. <https://doi.org/10.22579/20112629.524>
- Camarena-Tello, J.C., Martínez-Flores, H.E., Garnica-Romo, M.G., Padilla-Ramírez, J.S., Saavedra-Molina, A., Álvarez-Cortes, O. and Rodiles-López, J.O., 2018. Quantification of phenolic compounds and in vitro radical scavenging abilities with leaf extracts from two varieties of *Psidium guajava* L. *Antioxidants*, 7(3), pp. 34. <http://doi.org/10.3390/antiox7030034>
- Cantero-Flores, A., Bailón-Morales, R., Villanueva-Arce, R., Calixto-Mosqueda, M. and Robles-Martínez, F., 2016. Composta elaborada con residuos verdes como mejorador de un suelo urbano. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 8(2), pp. 71-83. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.10.003>
- Castro-Sowinski, S., Herschkovitz, Y., Okony, Y. and Jurkevitch, E., 2007. Effects of inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria on resident rhizosphere microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 276, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00878.x>
- Cervantes-Martínez, J., Orihuela-Equihua, R. and Rutiaqui-Quñones, J.G., 2017. Acerca del desarrollo y control de microorganismos en la fabricación de papel. *Conciencia Tecnológica*, 54, pp. 1-9. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94454631001>
- Chávez-Díaz, I.F., Zelaya-Molina, L.X., Cruz-Cárdenas, C.I., Rojas-Anaya, E., Ruíz-Ramírez, S. and Santos-Villalobos, S., 2020. Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agrobiotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), pp. 1423-1436. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2492>
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F.T., Reich, P.B., Jeffries, T.C., Gaitán, J.J., Encinar, M., Berdugo, M., Campbell, C.D. and Singh, B.K., 2016. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 7, pp.105-41. <https://doi.org/10.1038/ncomms10541>
- Escalante-Estrada, J.A.S., Rodríguez-González, M.T. and Escalante-Estrada, Y.I., 2014. Tasa de crecimiento de biomasa y rendimiento de frijol en función del nitrógeno. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 2, pp. 1-8. <https://www.somecta.org.mx/Revistas/somectavol.2.1/1.%20CYTAM-201402.%20J.%20ALBERTOESCALANTEESTRADA.pdf>
- FAO., 2018. Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Roma. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>
- FAOSTAT., 2020. Estadísticas del sector agroalimentario. Disponible en: <https://www.fao.org/statistics/es/>. Consultado: 23 de noviembre de 2023.
- Faraz, R., Gokhale, M. and Gothwal, R., 2020. Callus extracts of *Oroxylum indicum* (L.) vent containing baicalein have in vitro antioxidant and antibacterial activities. *Biotechnología Vegetal*, 20(1), pp.51-62. <http://scielo.sld.cu/pdf/bvg/v20n1/2074-8647-bvg-20-01-51.pdf>
- Flores, F.D.J., Martínez, M.E., Silva, L.R. and Rivas, R., 2021. Empleo de biofertilizantes para la mejora nutricional de la fresa. *Revista Agrícola -TecnoAgro*, 152, pp. 29-30. <http://tecnoagro.com.mx/no.-152/empleo-de-biofertilizantes-bacterianos-para-la-mejora-nutricional-de-fresa>
- Gallego, L. and Araque, O., 2019. Variables de influencia en la capacidad de aprendizaje. Un análisis por conglomerados y componentes principales. *Información Tecnológica*, 30(2), pp. 257-264. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000200257>
- García-Palacios, P., Shaw, E.A., Wall, D.H. and Hättenschwiler, S., 2016. Temporal dynamics of biotic and abiotic drivers of litter decomposition. *Ecology Letters*, 19(5), pp. 554-563. <https://doi.org/10.1111/ele.12590>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)., 2010. Anuario Estadístico del Estado de Michoacán. pp. 45-50. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/16/16053.pdf

- International Business Machines Corporation (IBM). SPSS Released., 2017. Statistics for Windows, Ver. 25.0. 2017. IBM Corp., Armonk, NY, USA.
- Jacobsen, S.E., Sorensen, M., Pedersen, S.M. and Weiner, J., 2015. Using our agrobiodiversity: plan-based solutions to feed the world. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, pp. 1217-1235. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0325-y>
- Jiménez-Delgadillo, R., Valdés-Rodríguez, S.E., Olalde-Portugal, V., Abraham-Juárez, R. and García-Hernández, J.L., 2018. Efecto del pH y temperatura sobre el crecimiento y actividad antagónica de *Bacillus subtilis* sobre *Rhizoctonia solani*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(2), pp. 256-275. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1711-3>
- Lu, L., Wang, J., Zhu, R., Lu, H., Zheng, X. and Yu, T., 2015. Transcript profiling analysis of *Rhodosporidium paludigenum* mediated signaling pathways and defense responses in mandarin orange. *Food Chemistry*, 172, pp. 603–612. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.097>
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C.B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M.L., Calderón-Zavala, G. and Anaya-Rosales, S., 2015. Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1), pp. 31-51. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003
- Mogollón, J., Martínez, A. and Torres, D., 2016. Efecto de la aplicación de vermicompost en las propiedades biológicas de un suelo salino-sódico del semiárido venezolano. *Bioagro*, 28(1), pp. 29-36. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612016000100004
- Montaño, N. and Sánchez-Yañez, J., 2014. Nitrificación en suelos tropicales, asunto de competencia microbiana: un modelo basado en la teoría de Lotka-Volterra. *Ecosistemas*, 23(3), pp. 98-104. <http://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-3.13>
- Moreno-Roblero, M., Pineda-Pineda, J., Colinas-León, M.T. and Sahagún-Castellanos, J., 2020. El oxígeno en la zona radical y su efecto en las plantas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), pp. 931-943. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2128>
- Muniz, A. da S., Aragão, L. de O. and de Souza, S.L.Q., 2022. Contaminação química de alimentos vegetais e a saúde: Agricultura convencional x orgânica. *Revista Sustinere*, 10(2), pp. 434–450. <https://doi.org/10.12957/sustinere.2022.59976>
- Navarro, C.J.M., Casas, C.G.M. and González R.E., 2010. Análisis de Componentes Principales y Análisis de Regresión para Datos Categóricos. Aplicación en la Hipertensión Arterial. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 17(2), pp. 199-230. <https://doi.org/10.15517/rmta.v17i2.2128>
- Ordaz, O.G., Juárez, C.A., Portillo, M.L., Pérez S.R.E. and Ortiz, R.R., 2019. Evaluación productiva y análisis costo-beneficio de cerdas alimentadas con una dieta adicionada con nopal (*Opuntia ficus-indica*) durante la lactancia. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(4), pp. 1027-1041. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4932>
- Ortiz-Texon, J.A., Delgadillo-Martínez, J., Rodríguez-Mendoza, M. and Calderón-Zavala, G., 2016. Inoculación bacteriana en el crecimiento y calidad del fruto de cinco variedades de fresa en suelos con pH contrastante. *Terra Latinoamericana*, 34(2), pp. 177-185. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/95>
- Pérez, S.R.E., Delgado S., Lauro A., García S.P.A., Pulido J. and Ortiz R.R., 2015. Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias. *Nova Scientia*, 7(15), pp. 133-152. <https://doi.org/10.21640/ns.v7i15.312>
- Prieto-Méndez, J., González-Ramírez, C.A., Román-Gutiérrez, A.D. and Prieto-García, F., 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), pp. 29-44. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/25>
- Quishpi, G.J.F., 2021. Utilización del nopal en la industria alimentaria para la elaboración de alimentos funcionales. [Tesis de Licenciatura]. Riobamba, (Ecuador): Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

- <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/15525/1/27T00477.pdf>
- Ramírez-Castaño, A.P., León, F.J., Alfaro-Wisaquillo, Y.M., Álvarez-Quintero, R.M. and Zapata-Ocampo, P.A., 2023. Morfometría de cladodios de nopal cultivado en Santander - Colombia: Estudio exploratorio. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10(2), pp. 88-101. <https://doi.org/10.23850/24220582.5737>
- Reyes-Reyes, M.A., Puentes-Cala, E.A., Casanova-Montes, E.L., López-Deluque, F., Panqueva-Álvarez, J.H. and Castillo-Villamizar, G.A., 2018. Inmovilización de bacterias potencialmente degradadoras de petróleo crudo en matrices orgánicas naturales y sintéticas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(4), pp. 597-609. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.04>
- Rives, N., Acebo, Y. and Hernández, A., 2007. Bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). perspectivas de su uso en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 28(2), pp. 29-38. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/310>
- Rives-Castillo, S.C., Correa-Pacheco, Z.N., Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R.I., Schettino-Bermudez, B.S., Ortega-Gudiño, P. and Barajas-Cervantes, A., 2021. Análisis químico proximal y térmico en harinas de productos residuales de nopal (*Opuntia ficus-indica*) para obtención de compuestos poliméricos biobasados. *Agrociencia*, 55(5), pp. 403-416. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i5.2516>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. and Pennock, D., 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/7d70ca8d-7503-4839-8d6b-8250e9add8ac/content>
- Rolón, O.S.A. and Causarano, H., 2000. Heterogeneidad del suelo en un campo experimental y su efecto sobre el sesamo (*Sesamum indicum* L.). *Investigación Agraria*, 4(1), pp. 13-16. <https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/193>
- SADER., 2020. El nopal es un producto endémico de México en donde, además, se ha diversificado: de las 200 especies de nopales, 101 viven en nuestro país. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-mexicano> Consultado: 28 de noviembre de 2023
- SAS Institute Inc., 2010. Correlation of Pearson. In Chapter 2. The CORR Procedure. Base SAS® 9.2 Procedures Guide: Statistical Procedures, Third Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc. pp. 3 – 59. [https://datajobs.com/data-science-repo/SAS-Stat-Guide-\[SAS-Institute\].pdf](https://datajobs.com/data-science-repo/SAS-Stat-Guide-[SAS-Institute].pdf)
- SIAP., 2023. ¿Y el nopal ingreso en la dieta simbólica y real de los mexicanos! Cifras y datos sobre esta ancestral planta. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/y-el-nopal-ingreso-en-la-dieta-simbolica-y-real-de-los-mexicanos#:~:text=Su%20producci%C3%B3n%20en%20el%20a%C3%B1o,conseguir%2070.5%20toneladas%20por%20hect%C3%A1rea> Consultado: 23 de noviembre de 2023.
- Stalikas, C.D., 2007. Extraction, separation, and detection methods for phenolic acids and flavonoids. *Journal of Separation Science*, 30(18), pp. 3268-3295. <https://doi.org/10.1002/jssc.200700261>
- Torres-Ponce, R.L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M.D.L. and Nevárez-Moorillón, G.V., 2015. El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), pp. 1129-1142. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i5.604>
- World Reference Base for Soil Resources (WRB)., 2006. A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Reports. 103. Roma, FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1bd0747c-e9d8-4b28-99bf-55684d121e38/content>
- Zhu, Q., Liu, X., Hao, T., Zeng, M., Shen, J., Zhang, F. and De Vries, W., 2018. Modeling soil acidification in typical Chinese cropping systems. *Science of the Total Environment*, 613, pp. 1339-1348. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.257>

