



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas

Facultad de Químico Farmacobiología

**Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del
nopal verdura y forrajero (*Opuntia ficus-indica*) sobre sus
características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas**

tesis que presenta:

MVZ. Manuel Galvan Aguilar

Como requisito para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Biológicas

Directora de tesis:

Dra. Rosa Elena Pérez Sánchez

Co- Directo de tesis:

Dr. Jaime Espino Valencia

Morelia, Michoacán, Febrero de 2025



Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

Dedicatoria

A Dios por guiarme por el camino correcto, porque nunca me ha abandonado, por darme fortaleza y su mano de fidelidad en los días difíciles estando siempre conmigo hasta el día de hoy.

Con gratitud infinita hacia mis queridos padres, quienes a lo largo de sus vidas me han inculcado la cultura del trabajo y estudio. Su dedicación y esfuerzo constante para asegurarme una educación son el regalo que valoro más allá de las palabras. Esta tesis es el testimonio de su sacrificio y amor, y un recordatorio constante de la importancia del trabajo duro y la educación en nuestras vidas.

A mi hermano por estar siempre presente, acompañándome para poderme realizar durante mi preparación académica.

Con cariño a mi novia Lizeth, por haberme acompañado en este camino, por creer en mí cuando yo mismo dudaba, y por alentarme a seguir adelante en los momentos más difíciles. Este logro es también tuyo, porque tú me has inspirado, motivado y ayudado a crecer como persona y como profesional.

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado a través de su financiamiento, el cual fue fundamental para la realización de esta investigación.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesora, la Dra. Rosa Elena Pérez Sánchez, por su paciencia, orientación, confianza y apoyo incondicional a lo largo de este proceso. Su conocimiento y compromiso han sido fundamentales para la realización de este trabajo, así como sus constantes motivaciones, que me impulsaron a afrontar y superar los desafíos de esta investigación con determinación.

Al Dr. Ruy Ortiz Rodríguez, por su invaluable guía, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. Su conocimiento y experiencia han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación, pero más aún, su apoyo y confianza en mi trabajo me han impulsado a superar los desafíos con determinación y compromiso. Más allá de su rol como asesor, su exigencia y orientación me han dejado valiosas enseñanzas que trascienden este proyecto y que llevaré conmigo en mi vida académica y profesional.

A los miembros de mi comité sinodal, los Dres. Jaime, Héctor, Daniel y Manuel, por su tiempo, dedicación y valiosas contribuciones a este trabajo. Aprecio su disposición para guiarme con sus observaciones y recomendaciones, así como su compromiso con la excelencia académica.

A los miembros de LIDA, los Dres. Migue, Rafa, Osvaldo y Alfonso cuyo apoyo, guía y colaboración fueron fundamentales en el desarrollo de esta investigación. Su disposición para compartir conocimientos, su paciencia y su compromiso con el trabajo en equipo hicieron de este proceso una experiencia enriquecedora.

Índice

1. Resumen	6
2. Summary	8
3. Introducción	10
4. Hipótesis	19
5. Objetivo general.....	19
5.1 Objetivos particulares	19
6. Marco metodológico general.....	19
7. Capítulo 1. Efecto biofertilización del cultivo de nopal verdura y forrajero (<i>O. ficus-indica</i>) sobre variables bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas y su relación con la producción de biomasa	21
7.1 Introducción	22
7.2 Materiales y métodos.....	23
7.3 Resultados y discusión	28
7.4 Conclusión	40
7.5 Referencias	41
8. Capítulo 2. Elaboración y caracterización del extrusado del nopal verdura y forrajero (<i>O. ficus-indica</i>) y su efecto en sus características nutrimentales	48
8.1 Introducción	49
8.2 Materiales y métodos.....	49
8.3 Resultados y discusión	51
8.4 Análisis termicogravimétrico (TGA)	59
8.5 Conclusión	59
8.6 Referencias	60
9. Capítulo 3. Evaluación de la calidad del extrusado de nopal verdura y forrajero (<i>O. ficus indica</i>) sometido a un proceso de vida de anaquel acelerada.....	68
9.1 Introducción	69
9.2 Materiales y métodos.....	70
9.3 Resultados y discusión	71
9.4 Conclusión	74
9.5 Referencias	74
10. Discusión general.....	77
11. Conclusion general	82

12. Bibliografía	82
13. Anexos	101

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de congruencia en la utilización de fertilizantes en el cultivo de nopal verdura y forrajero.	15
Tabla 2. Composición físico- química (promedio $\pm$ de) del suelo de la parcela de NV y NF evaluada.	23
Tabla 3. Tratamientos de fertilización del NF y NV (<i>O. ficus-indica</i>).	24
Tabla 4. Análisis de efectos fijos para las variables morfológicas, bromatológicas y fitoquímicas del nv y nf.	29
Tabla 5. Medias de mínimos cuadrados para las variables del análisis bromatológico y morfológico del nv y nf de acuerdo con la anidación tratamiento (variedad).	31
Tabla 6. Acp para la determinación de la biomasa producida por el nopal verdura y forrajero (<i>O. ficus-indica</i>) independientemente del tipo de fertilizante (tratamiento) aplicado ..	34
Tabla 7. Coeficientes de regresión múltiple por componente para la predicción de biomasa (kg) de nopal verdura y forrajero (<i>O. ficus-indica</i>)	35
Tabla 8. ACP para la determinación de biomasa del NV y NF (<i>O. ficus-indica</i>) de acuerdo con el tratamiento (fertilización).	39
Tabla 9. Medias de mínimos cuadrados para ($\pm$ error estándar) para las variables bromatológicas (g/100g bs) de NV y NF de acuerdo con el tratamiento.	52
Tabla 10. Medias de mínimos cuadrados de aw, humedad y dureza, de acuerdo con los días de medición.	72
Tabla 11. Medias de mínimos cuadrados para el color de los tratamiento y día de medición	73

índice de gráficas y esquemas

Gráfica 1 y 2. Medias de mínimos cuadrados para ($\pm$ error estándar) para las variables bromatológicas (g/100g bs) de nopal verdura y forrajero de acuerdo con el tratamiento.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
Gráfica 3. Medias de mínimos cuadrados para actividad antioxidante del nopal (<i>O. ficus-indica</i>) verdura y forrajero de acuerdo con el tratamiento.	55
Esquema 1. Modelación esquemática del cambio de correlaciones de pearson entre los indicadores bromatológicos y fitoquímicos del nopal verdura y forrajero (<i>O. ficus indica</i>) sometido al proceso de extrusión y deshidratación.	58

1. Resumen

El objetivo general de la presente investigación fue determinar el efecto de la biofertilización y el proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) en base fresca y extrusado sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas. Para ello, se establecieron cuatro objetivos particulares: 1) Evaluar los cambios bromatológicos, fitoquímicos y morfológicos del nopal verdura y forrajero post-fertilización; 2) Determinar la humedad óptima de la deshidratación de nopal verdura y forrajero para la realización de un adecuado proceso de extrusión.; 3) Elaborar y caracterizar químicamente el extrusado de nopal verdura y forrajero y 4) Establecer la vida de anaquel del extruido de nopal verdura y forrajero. La investigación se llevó a cabo en dos parcelas: nopal verdura (NV), ubicada en la localidad de La Concepción, municipio de Morelia, Michoacán, México y nopal forrajero (NF), ubicada en la comunidad de La Trinidad de los Ángeles, Guanajuato, México. Para el primer objetivo, el diseño experimental por parcela consistió en cuatro bloques al azar con cuatro tratamientos/bloque (T1=químico, T2=composta, T3=químicos más bioinoculante y T4=composta más bioinoculante). Las variables evaluadas fueron análisis bromatológico de los cladodios, se determinó: materia seca (MS), proteína (PC), extracto etéreo (EE), cenizas (C), fibra cruda (FC), extracto libre de nitrógeno (ELN) bajo los criterios de la AOAC; Análisis fitoquímico: FEN, FLAV y AA; análisis morfológico (largo, ancho, grosor y peso) y la producción de biomasa (PB) en base fresca (BF). Para los objetivos 2 y 3, se tomó un pool de 12 kg de nopal al azar de toda la parcela del NV y NF, para conformar cuatro tratamientos (Trat): Trat-A= NV en BF; Trat-B= NF en BF; Trat-C= extrusado de NV y Trat-D= extrusado de NF, se evaluaron las variables del análisis bromatológico y fitoquímicos, así como el comportamiento de la deshidratación mediante el análisis termogravimétrico. Finalmente, para el objetivo 4, se establecieron dos tratamientos: EXT-NV (extrusado de nopal verdura) y EXT-NF (extrusado de nopal forrajero), con cuatro repeticiones de 20 g de extrusado de nopal/tratamiento empaquetadas en bolsas ziploc. Todas las muestras se colocaron dentro de una cámara climática, a temperatura de 45 ± 1 °C y 50 ± 5 %. Se evaluó la vida de anaquel acelerada tomando como referencia las variables de color, dureza, actividad de agua (AW). La información recabada se analizó mediante los modelos lineales generales y las diferencias entre tratamientos y variedades se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans), así como el análisis de componentes principales

(ACP). Los resultados mostraron mayores valores en el T4 ($p<0.05$) de PC (9.5%) y Ceniza (24.6%) para el NF. Los mayores valores de FEN (1.05 mg EAG/g), FLAV (9.4 mg EQ/g) y AA (30%) se observaron en el T2 del NF. En relación PB en el NV la mayor ($p<0.05$) producción de biomasa fue para el T2 (25.0 kg). En cuanto al ACP, se encontró que, en el NV, el T1 y T2 produjeron mayor PB (24.1 y 23.8 kg, respectivamente), con 81.8 y 75.2% de varianza explicada (VA) y en la variedad de NF, el T2 y T4 mostraron mayor PB (14.2 y 18.86, respectivamente), con 84.42 y 81.26% de VA. Referente a los objetivos 2 y 3, en las variables bromatológicas, se encontró que todos los tratamientos fueron diferentes ($p<0.05$) en BF y extrusado dentro de ambas variedades de nopal, únicamente fue igual ($p>0.05$) el promedio de extracto libre de nitrógeno (ELN) (56.3 y 56.4%, respectivamente) en el NV. En AA, se encontró efecto ($p<0.05$) de tratamiento: 22.6 y 17.4%, para el extrusado de NF y NV. El análisis termicogavimétrico, mostró comportamientos similares en la pérdida de peso, obteniendo 90% de pérdida para ambas muestras (NV y NF), sin embargo, se observó que el NF requiere menor cantidad de tiempo para alcanzar una pérdida máxima con respecto al NV, el cual requiere 220 minutos. Posterior al proceso de extrusión, se observó el mismo comportamiento descrito para el nopal en BF. En cuanto a los resultados del objetivo 4, se encontró que el Ext-NV en la Aw, mostró mayores valores y diferentes ($p>0.05$) a lo largo de la evaluación (0.430, a 0.403). La humedad, en los días 125 y 165 de medición el EXT-NF (7.3 y 5.7%, respectivamente) mostró los mayores ($p<0.05$) valores. La dureza en los días 85 y 125 (36.3 y 32.4 N, respectivamente) fue mayor ($p<0.05$) en el EXT-NF. En cuanto al color, en el día 85, 125 y 165, el EXT-NV presentó mayor ($p<0.05$) luminosidad (41.6, 37.4 y 36.7), con respecto al EXT-NF (38.7, 35.5 y 33.1). Referente al croma el EXT-NF mostró valores más elevados ($p<0.05$) desde el inicio hasta el día 165 de medición (16.7 a 13.0, respectivamente). Así mismo, el EXT-NF (86.9 a 83.5) presentó mayores ($p<0.05$) valores del $^{\circ}$ hue vs EXT-NV (84.8 a 81.9), durante los días de medición. Mediante la caracterización de los componentes del NV y NF fertilizado y procesado, determinó que la aplicación de composta y composta más bioinoculante mejora la productividad y los parámetros químicos, así como el proceso de extrusión mejorar componentes nutricionales como la proteína y las cenizas, al igual que este proceso mantiene las características fitoquímicas del nopal en BF.

Palabras clave: cactácea, bioinoculante, extrusión, vida de anaquel.

2. Summary

The general objective of this research was to determine the effect of biofertilization and the extrusion process of the vegetable and forage cactus (*O. ficus-indica*) on a fresh and extruded basis on its bromatological, phytochemical and morphological characteristics. To do this, four specific objectives were established: 1) To evaluate the bromatological, phytochemical and morphological changes of the vegetable and forage cactus after fertilization; 2) To determine the optimal humidity of the dehydration of the vegetable and forage cactus for the realization of an adequate extrusion process; 3) To prepare and chemically characterize the extruded vegetable and forage cactus and 4) To establish the shelf life of the extruded vegetable and forage cactus. The research was carried out in two plots: nopal vegetal (NV), located in the town of La Concepción, municipality of Morelia, Michoacán, Mexico and nopal forrajero (NF), located in the community of La Trinidad de los Ángeles, Guanajuato, Mexico. For the first objective, the experimental design per plot consisted of four randomized blocks with four treatments/block (T1=chemical, T2=compost, T3=chemicals plus bioinoculant and T4=compost plus bioinoculant). The variables evaluated were bromatological analysis of the cladodes, the following were determined: dry matter (DM), protein (PC), ether extract (EE), ash (C), crude fiber (FC), nitrogen-free extract (ELN) under the AOAC criteria; Phytochemical analysis: FEN, FLAV and AA; morphological analysis (length, width, thickness and weight) and biomass production (PB) on a fresh basis (BF). For objectives 2 and 3, a pool of 12 kg of nopal was taken at random from the entire NV and NF plot, to form four treatments (Treatment): Trat-A = NV in BF; Trat-B = NF in BF; Trat-C = NV extrusion and TratD = NF extrusion, the variables of the bromatological and phytochemical analysis were evaluated, as well as the dehydration behavior through thermogravimetric analysis. Finally, for objective 4, two treatments were established: EXT-NV (vegetable nopal extrusion) and EXT-NF (forage nopal extrusion), with four repetitions of 20 g of nopal extrusion/treatment packed in ziploc bags. All samples were placed in a climatic chamber, at a temperature of 45 ± 1 °C and $50 \pm 5\%$. The accelerated shelf life was evaluated taking as reference the variables of color, hardness, water activity (AW). The information collected was analyzed using general linear models and the differences between treatments and varieties were obtained using the least squares means test (LsMeans), as well

as the principal component analysis (PCA). The results showed higher values in T4 ($p < 0.05$) of PC (9.5%) and Ash (24.6%) for NF. The highest values of FEN (1.05 mg EAG/g), FLAV (9.4 mg EQ/g) and AA (30%) were observed in T2 of NF. In relation to CP in NV, the highest ($p < 0.05$) biomass production was for T2 (25.0 kg). Regarding the ACP, it was found that, in the NV, T1 and T2 produced higher CP (24.1 and 23.8 kg, respectively), with 81.8 and 75.2% of explained variance (VA) and in the NF variety, T2 and T4 showed higher CP (14.2 and 18.86, respectively), with 84.42 and 81.26% of VA. Regarding objectives 2 and 3, in the bromatological variables, it was found that all treatments were different ($p < 0.05$) in BF and extrusion within both varieties of cactus, only the average nitrogen free extract (ELN) was the same ($p > 0.05$) (56.3 and 56.4%, respectively) in the NV. In AA, a treatment effect was found ($p < 0.05$): 22.6 and 17.4%, for the NF and NV extrusion. The thermogravimetric analysis showed similar behaviors in weight loss, obtaining 90% loss for both samples (NV and NF). However, it was observed that the NF requires less time to reach a maximum loss with respect to the NV, which requires 220 minutes. After the extrusion process, the same behavior described by the nopal in BF was observed. Regarding the results of objective 4, it was found that the Ext-NV in the Aw showed higher and different values ($p > 0.05$) throughout the evaluation (0.430, to 0.403). The humidity, on days 125 and 165 of measurement, the EXT-NF (7.3 and 5.7%, respectively) showed the highest ($p < 0.05$) values. The hardness on days 85 and 125 (36.3 and 32.4 N, respectively) was higher ($p < 0.05$) in the EXT-NF. Regarding color, on day 85, 125 and 165, EXT-NV presented higher ($p < 0.05$) luminosity (41.6, 37.4 and 36.7), compared to EXT-NF (38.7, 35.5 and 33.1). Regarding chroma, EXT-NF showed higher values ($p < 0.05$) from the beginning to day 165 of measurement (16.7 to 13.0, respectively). Likewise, EXT-NF (86.9 to 83.5) presented higher ($p < 0.05$) °hue values vs EXT-NV (84.8 to 81.9), during the measurement days. By characterizing the components of fertilized and processed vegetable and forage nopal, it was determined that the application of compost and compost plus bioinoculant improves productivity and chemical parameters, as well as the extrusion process improves nutritional components such as protein and ash, just as this process maintains the phytochemical characteristics of the nopal on a fresh basis.

Keywords: cactus, bioinoculant, extrusion, shelf life.

3. Introducción

El panorama global de la seguridad alimentaria se encuentra en constante evolución debido a la intersección de diversos factores, como lo son: el crecimiento demográfico, la degradación ambiental y los patrones cambiantes de consumo. En respuesta a estas preocupaciones, existe un renovado interés en la identificación y desarrollo de nuevas fuentes de alimentos que sean sustentables, nutritivas y adaptables a condiciones difíciles (FAO, 2018). En este sentido, surge como alternativa alimenticia, el nopal (*O. ficus-indica*) la cual es una planta originaria de América que, debido a su gran capacidad de adaptación, se ha extendido a distintas regiones del mundo, incluyendo el Mediterráneo, África y Asia (Bautista-Justo *et al.*, 2010).

El cultivo del nopal se destaca por su resistencia a condiciones climáticas adversas, como la sequía y su habilidad para crecer y desarrollarse en suelos poco fértiles, así como en terrenos marginales, en donde contribuyen a la conservación del suelo y la biodiversidad (Almaguer-Sierra *et al.*, 2014; Varela-Pérez *et al.*, 2024). Así mismo, el cultivo de nopal a lo largo de la historia ha formado parte fundamental en la alimentación y la economía de las civilizaciones (Hernández-Urbiola *et al.*, 2011).

En México el nopal se clasifica en tres tipos de acuerdo con su utilización: como fruta, forraje y para consumo humano como verdura, este último en años recientes se ha incrementado su producción, pasando de 174.6 a 872.3 miles de toneladas, entre 1990 y 2022, mientras que la superficie sembrada creció de 6132 a 12 853 hectáreas, siendo los estados de Morelos, Ciudad de México, Estado de México, Puebla e Hidalgo los principales productores (SIAP, 2020; SIAP, 2023), los cuales, tienen un rendimiento de 70.5 toneladas por hectárea. Dicho incremento en la producción se debe al constante aumento en el consumo per cápita anual de este (6.4 kg) (FND, 2020), debido a sus múltiples propiedades (nutrimentales y nutraceuticas) y funciones ecológicas en la captura de carbono, conservación del suelo y producción sostenible en zonas áridas (El-Mostafa *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2017).

En cuanto a la producción nopal forrajero, está se encuentra en constante cambio en las últimas tres décadas, no obstante, se ha evidenciado una tendencia a la baja, en 2013 se cultivaron 15,987 ha y la producción fue de 140.7 T (SAGARPA-SIAP, 2015), pero en 2017

se cultivaron 17, 174 ha y se obtuvo una producción de 496. 6 T (SIAP, 2017). Actualmente, se sembraron 12,081 hectáreas de nopal forrajero, de las cuales se cosecharon 12, 079 hectáreas, mismas que generaron una producción 130 mil toneladas, con un rendimiento de 10.8 toneladas por hectárea (SIAP, 2023). Dicho decremento, se le puede atribuir a una combinación de factores, incluyendo la disponibilidad de nopales silvestres, lo cual provoca una reducción en el interés en producir o comprar nopal forrajero, así como los desafíos socioeconómicos y técnicos que enfrentan los productores (Anaya-Pérez y Bautista-Zane, 2008). No obstante, más allá de la cantidad producida, la calidad del nopal es determinante para incrementar su valor comercial y su aceptación en mercados nacionales e internacionales (Maki-Díaz *et al.*, 2015).

Referente al nopal verdura este, es ampliamente utilizado en la alimentación humana, ya que, posee nutrientes esenciales, como vitamina C, vitamina A, calcio y potasio (Guzmán y Chávez, 2007). En cuanto al contenido mineral del nopal verdura, Fernández-Pavía *et al.* (2015), reportaron valores de 2.2, 0.8, 5.7, 3.3 y 1.7 % en N, P, K, Ca, y Mg, respectivamente. De igual manera, esta cactácea se caracteriza por ser una fuente abundante de fibra dietética, promoviendo la salud digestiva y previene los trastornos gastrointestinales, además, reduce tanto los niveles de colesterol total, como los niveles posprandiales de glucosa y/o insulina en la sangre (Peña-Valdivia *et al.*, 2012; Eswaran *et al.*, 2013; Capuano, 2017).

Aunado a lo anterior, el nopal verdura también cuenta con compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, de los cuales destacan: los ácidos fenólicos, polifenoles, flavonoides, indicaxantina, neobetanina y betalaina, de los cuales actualmente ha surgido interés, específicamente por los polifenoles como resultado de su potencial capacidad antioxidante que participa en beneficios para la salud como la prevención de la inflamación, problemas cardiovasculares y las enfermedades neurodegenerativas, también han demostrado actividad anticancerígena (El-Mostafa *et al.*, 2014). Además, se ha demostrado que reducen el estrés oxidativo actuando mediante el atrapamiento de los radicales libres, de reaccionar con las especies reactivas de oxígeno y de formar complejos con el hierro (Bonilla *et al.*, 2017).

Por otro lado, el nopal forrajero (*O. ficus-indica*), se distingue por poseer un mínimo de espinas, lo cual es una característica deseable para la alimentación animal (Gebretsadik *et al.*, 2013). En cuanto a sus componentes nutricionales, el nopal forrajero contiene diversos aminoácidos como arginina, histidina, lisina, metionina y treonina (Hernández-Becerra *et al.*, 2022). El contenido de minerales, de esta variedad presenta valores significativos en Ca, Na, P, Fe, Mn y K, (2403, 627, 63, 0.09, 8.6, 13.8 mg/100 g respectivamente) (Flores y Reveles, 2010; Aguilar *et al.*, 2011; Astello *et al.*, 2015). En cuanto a las vitaminas, se encuentran presentes las vitaminas A, B1, B2 y C (Acevedo *et al.*, 2017).

En general el contenido nutricional de nopal (*O. ficus-indica*), oscila entre 8 a 17% de materia seca, de la cual 4 a 12% corresponde a proteína cruda, 35 a 45% fibra cruda, 17 a 25% cenizas, 1.4 a 3% de extracto etéreo y 42 a 60% de hidratos de carbono (Hernández-Urbiola *et al.*, 2010). Es un hecho que el nopal, ya sea verdura o forrajero, posee características que lo hacen un alimento con propiedades de importancia para su consumo, no obstante, este enfrenta ciertas problemáticas, tales como: la necesidad de incrementar su productividad y mejorar sus propiedades nutrimentales y fitoquímicas (Torres-Ponce *et al.*, 2015; di Bella *et al.*, 2022).

Tomando en consideración que el suelo es el principal reservorio de diferentes nutrientes esenciales para el crecimiento adecuado de las plantas y la producción sostenible de cultivos. El equilibrio de nutrientes en el suelo, es decir, la diferencia entre la entrada y la salida de nutrientes en el mismo, es un indicador de la fertilidad del suelo y también puede determinar la eficiencia del uso de nutrientes en diferentes sistemas de producción de cultivos (Al-Suhaibani *et al.*, 2020), por lo tanto la opción de utilizar fertilizantes (orgánico e inorgánicos) los cuales se han empleado como una opción para mejorar el rendimiento de los cultivos como en la calidad del nopal verdura y forrajero. La elección entre uno u otro depende de diversos factores como: el tipo de suelo, las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas locales (Wood *et al.*, 2014).

Durante un periodo de 2006 a 2023, se han realizado diversas investigaciones en la implementación de diversas técnicas de cultivo y fertilización con productos químicos, orgánicos y biofertilizantes, con la finalidad de incrementar la productividad y mejorar el

valor nutricional y biofuncional del nopal, la cual es una planta de gran importancia agrícola y alimentaria, estas técnicas han permitido establecer las mejoras productivas, fisicoquímicas y fitoquímicas en los cultivos de nopal (Tabla 1). Frecuentemente el nopal verdura y forrajero es cultivado en zonas áridas y semiáridas, bajo estas circunstancias los fertilizantes orgánicos surgen como una opción que permite la capacidad de retención de humedad y mejoran la biodiversidad del suelo (Ouédraogo *et al.*, 2001; Courtney *et al.*, 2008). No obstante, en circunstancias donde se demanda una respuesta rápida del cultivo, los fertilizantes inorgánicos pueden ser más adecuados, dado que la liberación es más rápida al contacto con el suelo, brindando los nutrientes faltantes, sin embargo, este tiene diversas desventajas (Tlelo-Cuautle *et al.*, 2020), tales como: afecciones a la estructura del suelo, degradación de la materia orgánica, acidificación y contaminación del ambiente (Talimbay y Finez 2023).

Por lo anterior, se han buscado estrategias adicionales que no solo incrementen la productividad y calidad del cultivo, sino que además benefician al ambiente, en este sentido la aplicación de bacterias inoculadas en los cultivos se presenta como una opción viable, puesto que, se ha determinado que mejoran la capacidad de la planta en la absorción de nutrientes (Adesemoye *et al.*, 2009; Emmanuel y Babalola, 2020; Saia *et al.*, 2020), la tolerancia de las plantas al estrés ambiental (hídrico, cambios de pH) (Forni *et al.*, 2017; Brilli *et al.*, 2019; Del Carmen *et al.*, 2020), incrementar los rendimientos y producción de los cultivos (Tsegaye *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2023) y mejorar las cualidades nutricionales de los cultivos (Bona *et al.*, 2017; Bona *et al.*, 2018).

Lo anterior se logra, a través de la fijación de nitrógeno atmosférico en formas disponibles para las plantas, como el amonio (Chamoli *et al.*, 2024), así como la liberación de ácidos orgánicos, enzimas y sideróforos que solubilizan compuestos de hierro y fósforo insoluble presentes en el suelo, haciéndolos accesibles para las plantas (Kaur *et al.*, 2016) principalmente en suelos poco fértiles. Además, mediante la síntesis de fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas, estas bacterias estimulan el crecimiento y desarrollo de raíces más extensas y eficientes, lo cual mejora la capacidad de las plantas en la absorción hídrica y de nutrientes (Wong *et al.*, 2015).

Al respecto, Guhra y Totsche. (2022) determinaron que la aplicación de materia orgánica (composta) en combinación con bacterias promueven la formación de agregados en el suelo, mediante la producción de sustancias poliméricas extracelulares, las cuales unen las partículas del suelo, mejorando su aireación, capacidad de retención de agua y reduce la probabilidad a la erosión (Costa *et al.*, 2018). Mitter *et al.* (2013), establecieron que la aplicación de bacterias benéficas en los cultivos, estas pueden competir con microorganismos perjudiciales (patógenos) y producir compuestos antimicrobianos, que favorecen un ambiente saludable para las plantas, permitiendo un mejor aprovechamiento de los recursos del suelo (Naik *et al.*, 2019).

La aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en el cultivo de nopal ha mostrado una mejoras significativa en sus características químicas y productivas, convirtiéndolo en un alimentos que provee beneficios para quien lo consume, Sin embargo, a pesar de que la producción de nopal es continua a lo largo del año, su demanda presenta una variabilidad estacional considerable, lo que provoca que aproximadamente el 63.3% de la producción total se desperdicie o descarte (SEDESOL, 2018), principalmente en los cladodios de madurez media y avanzada (>50 días), que no se destinan a la alimentación humana (Contreras-Padilla *et al.*, 2016).

Por otro lado, una vez cosechado el nopal enfrenta limitaciones notables en términos de conservación. Su alta cantidad de agua y bajo pH acortan su vida útil, lo que afecta negativamente su almacenamiento y comercialización (Contreras, 2012). A esto se suman los elevados costos postcosecha, que surgen debido a la mayor necesidad de mano de obra y los gastos asociados con la recolección y distribución del producto (Ortiz *et al.*, 2022). Por ello, Acosta (2006), propuso la necesidad de fomentar la creación de productos con valor agregado derivados del nopal, a través de cadenas de valor que impulsen la competitividad y el desarrollo económico, tanto para a la agroindustria de alimentos para consumo humano como la de alimentos para animales, incluyendo suplementos y productos elaborados a partir de cladodios y excedentes de la producción (Chávez *et al.*, 2023).

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

Tabla 1. Matriz de congruencia en la utilización de fertilizantes en el cultivo de nopal verdura y forrajero.

Variedad	Tecnología aplicada	Mejoras				Autor/año
		Morfológica	Bromatológico	Fitoquímicos	Productivos	
NF (OFI. Mill)	FQ	NE	NE	NE	↑ Producción	Dubeux <i>et al.</i> , 2006
NF (OFI)	FQ. FO e hibridación	NE	↑ en PC	NE	↑ Producción	Guevara <i>et al.</i> , 2011
NF (OFI. Mill)	FQ. FO y densidad de plantación	↑ en número de cladodios	↑ en PC y FDA	NE	↑ Producción	Silva <i>et al.</i> , 2012
NF (Gigante)	FO y densidad de siembra	↑ altura de la planta y longitud	NE	NE	↑ Producción	Donato <i>et al.</i> , 2014
NV (OFI. L)	Cultivo en hidroponía y FQ Y FO	↑ en largo y ancho	NE	NE	NE	Fernández <i>et al.</i> , 2015
NF (<i>Opuntia sps</i>)	FQ e hibridación	NE	↑ en PC	NE	↑ Producción	Grünwaldt <i>et al.</i> , 2015
NF (<i>'Miúda'</i> (<i>Nopalea cochenillifera</i> Salm Dyck))	FQ y densidad de plantación	NE	NE	NE	↑ Producción	Carvalho <i>et al.</i> , 2017
NV (OFI)	FO FQ y lixiviados	↑ en largo y ancho	NE	NE	↑ Producción	Tavera-Cortés <i>et al.</i> , 2018
NF (OFI. L.)	Invernadero. FQ y FO	NE	↑ en PC	NE	NE	Mayer y Cushman, 2019
NV (<i>Nopalea cochenillifera</i>)	Cultivo en hidroponía. FQ. FO y temperaturas	↑ el ancho y longitud	NE	NE	↑ Producción	Horibe, 2019
NF (<i>Nopalea cochenillifera</i> Salm Dyck)	FO. FQ y frecuencia de corte	↑ el ancho y longitud	NE	NE	↑ Producción	Vázquez <i>et al.</i> , 2019
NV (OFI)	Biofertilización	↑ en longitud, ancho y peso	↑ en PS	↑ en FEN. FLAV y AA	NE	Lahbouki <i>et al.</i> , 2021
Forrajero (Gigante)	Biofertilización	↑ la longitud y numero	NE	NE	↑ Producción	Fonseca <i>et al.</i> , 2021
Forrajero (OFI)	FO y cultivos intercalados	↑ la altura, número y peso	NE	NE	↑ Producción	Saraiva <i>et al.</i> , 2022
NV (<i>Opuntia stricto-Haw Haw</i>)	Biofertilización	↑ en largo, ancho y grosor	NE	↑ en AS CAR CLOR y FEN	↑ Producción	Silva <i>et al.</i> , 2023
NF (OFI. L)	Biofertilización	↑ en longitud, ancho y numero	NE	NE	↑ Producción	Fateminick <i>et al.</i> , 2023
NV (OFI)	Biofertilización	↑ en ancho, largo, peso y numero	NE	↑ FEN y AA	NE	Roldán <i>et al.</i> , 2023

NV= nopal verdura; NF= Nopal forrajero; OFI= *O. ficus-indica*; FO= fertilizante orgánico; FQ= fertilizante químico; ↑= incremento; NE= no especificado; PC= proteína cruda; FDA= fibra detergente acida; FEN=fenoles totales; FLAV; flavonoides totales; AS=ácido ascórbico; CAR= carotenoides; CLOE= clorofila; AA= actividad antioxidante

Por lo anterior, a lo largo del tiempo ha surgido un interés por desarrollar procesos que conserven las propiedades del nopal sin comprometer sus componentes nutricionales y nutracéuticos, utilizando diversas técnicas, al respecto Cantwel *et al.* (1992) determinaron que la introducción de nopal en bolsas de polietileno almacenadas a 5 °C incrementa su vida de útil hasta por 3 semanas sin anormalidades visuales perceptibles. Por otro lado, Guevara *et al.* (2001) establecieron que, el someter a los cladodios de nopal a una atmósfera controlada a 5°C con niveles inferiores a 8.6 kPa de O₂ y superiores a 6.9 kPa de CO₂, reducen las apariencias del deterioro de la calidad, mostrando una vida de anaquel de 30 días.

Otro de los procesos de conservación, es la harinificación del nopal, proceso que facilita su uso en diversas aplicaciones culinarias, elaboración de productos y proporciona disponibilidad del producto fuera de temporada, no obstante, se ha comprobado que la harina de nopal puede tener implicaciones en su digestibilidad y en la alteración de los componentes naturales de la planta (Elizondo, 2010). Aspecto que, representa una desventaja considerable en comparación con otras técnicas o procesos de preservación.

La liofilización del nopal es un proceso que ofrece beneficios significativos en términos de conservación de nutrientes y calidad del producto, sin embargo, el alto costo y la necesidad de equipo especializado dificulta su aplicación (Castro, 2022). No obstante, Shofian *et al.* (2011) en su investigación concluyen que, la técnica de liofilización puede afectar los componentes y la actividad antioxidantes de las frutas, lo que podría presentar una limitante en la utilización de este proceso.

En una investigación sobre la cocción del nopal a vapor a diferentes tiempos (4, 7 y 10 min), se encontró que el mejor tiempo de cocción con vapor a 100 °C es de 4 min, puesto se observó aumentó de proteína, extracto libre de nitrógeno, lípidos y la fibra soluble. Mientras que la cocción a 7 y 10 min observó una reducción de cenizas, fibra digestible y fibra insoluble (Ortiz *et al.*, 2022). No obstante, el utilizar este método genera una serie de desventajas, tales como el incremento en los costos (mano de obra, gas natural e insumos de cocina) en la obtención del nopal cocido al vapor (Ortiz *et al.*, 2022). Tomando como base lo anterior el explorar el proceso de pelletización o extrusión de nopal puede ser una estrategia que pudiera permitir disminuir la mano de obra en la recolección y suministro, así como también poder incrementar su vida útil.

La pelletización es un proceso que ofrece diversas ventajas, como mayor vida útil, facilidad de almacenamiento y transporte y, mayor densidad nutricional. Además, dicho proceso mejora sustancialmente la digestión y absorción de los nutrientes (Loor, 2016). Sin embargo, este proceso tiene algunas desventajas como es el control de la calidad del procesamiento (humedad, temperatura, la calidad de vapor si es que se utiliza), la durabilidad, entendiendo esta como dureza y apariencia (el color, la textura, uniformidad de tamaño, porcentaje de finos y palatabilidad) (Serra, 2020). En este sentido, dentro del procesamiento de la pelletización del nopal se debe tener en cuenta que, al someter al nopal a este proceso, puede producir pérdida de compuestos nutritivos, principalmente aquellos que reaccionan rápidamente a temperaturas mayores a 50°C , como es el caso de los metabolitos secundarios (Pérez, 2021); debido a que en el proceso de pelletización se genera calor por fricción mecánica del material con las paredes del pelletizador mayores a 50°C (Loor, 2016; Paulino, 2020).

La extrusión se presenta como una alternativa para el procesamiento del nopal, en donde dicho proceso la masa o material es forzado a través de una matriz de un tubo o conducto bajo alta presión y temperatura, este proceso permite dar forma y textura al material, como en la producción de alimentos, plásticos o productos farmacéuticos (Maurya y Said, 2014). El proceso de extrusión se ha convertido en una técnica importante en las industrias de procesamiento de alimentos con sus numerosas ventajas sobre otros métodos de procesamiento, puesto que es uno de los métodos más rentables y que ofrece una plataforma para el procesamiento de diferentes productos de varios grupos de alimentos modificando ingredientes menores o mayores y condiciones de procesamiento (Bouvier y Campanella, 2014).

La extrusión en alimentos se puede dividir en dos tipos según la temperatura utilizada: extrusión en caliente y extrusión en frío; en la extrusión en caliente o cocción por extrusión, los materiales se procesan a altas temperaturas ($>100^{\circ}\text{C}$), este consiste generalmente en transformar termomecánicamente materias primas en condiciones de tiempo corto y alta temperatura (HTST) bajo presión, utilizada principalmente para producir alimentos texturizados y productos para piensos, así como cereales para el desayuno, snacks, por mencionar algunos ejemplos. (Alam *et al.*, 2015). No obstante, las altas temperaturas dificultan su implementación, puesto que pueden afectar los componentes bioactivos presentes en el nopal (Chang *et al.*, 2016). Por otro lado, la extrusión en frío se realiza a temperaturas más bajas para preservar sus propiedades originales,

se utiliza para mezclar y dar forma suavemente a la masa, sin calentarla ni cocerla directamente dentro de la extrusora (Shelar y Gaikwad, 2019).

Al respecto, Choton *et al.* (2020), mencionan que, el proceso de extrusión en los alimentos mejora el valor nutricional y reduce los compuestos antinutricionales (ácido fítico y el ácido tánico), además de mejorar la digestibilidad de las proteínas (destruyen inhibidores de trisina) y mejoran la actividad antioxidante, así como el aumento de las fibras dietéticas solubles, y la reducción de la oxidación de lípidos, así como la destrucción de microorganismos contaminantes. En general, la extrusión desempeña un papel importante en la producción de una amplia variedad de alimentos e ingredientes.

Pérez-viveros *et al.* (2024), evaluaron las propiedades fisicoquímicas y funcionales de harinas obtenidas de cladodios maduros de dos especies de nopal, sometidas a diferentes condiciones de extrusión, encontrando que la extrusión incrementó (4.99 a 10.38 %) el contenido de fibra soluble y disminuyó (36.91 a 32.30 %) el contenido de fibra insoluble en ambas especies, pero los compuestos fenólicos, flavonoides y la actividad antioxidante fueron afectados significativamente por el proceso de extrusión en la mayoría de los tratamientos, aunque algunos mantuvieron o mejoraron estas propiedades. Lo cual presenta un base en la información, sin embargo, la información es poca, lo que dificulta establecer con claridad cuáles son los efectos del proceso de extrusión en el nopal verdura y forrajero, asimismo, no existen estudios que aborden desde el cultivo hasta el procesamiento del nopal. De tal manera que el objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de la biofertilización del nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) en base fresca y extrusado sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas.

4. Hipótesis

- La biofertilización y el proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) permiten mejorar sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

5. Objetivo general

- Determinar el efecto de la biofertilización y el proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) en base fresca y extrusado sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas.

5.1 Objetivos particulares

- Evaluar los cambios bromatológicos, fitoquímicos y morfológicos del nopal verdura y forrajero post-fertilización.
- Determinar la humedad óptima de la deshidratación de nopal verdura y forrajero para la realización de un adecuado proceso de extrusión.
- Elaborar y caracterizar químicamente el extrusado de nopal verdura y forrajero.
- Establecer la vida de anaquel del extruido de nopal verdura y forrajero.

6. Marco metodológico general

La investigación se llevó a cabo en dos parcelas: nopal verdura (NV), ubicada en la localidad de La Concepción, municipio de Morelia, Michoacán, México y nopal forrajero (NF), ubicada en la comunidad de La Trinidad de los Ángeles, Guanajuato, México. Para el logro del primer objetivo: 1) Evaluar los cambios bromatológicos, fitoquímicos y morfológicos del nopal verdura y forrajero post-fertilización, el diseño experimental por parcela consistió en cuatro bloques al azar con cuatro tratamientos (T)/bloque: T1=químico, T2=composta, T3=químicos más bioinoculante y T4=composta más bioinoculante. Las variables evaluadas fueron: a) análisis bromatológico de los cladodios, de los cuales se determinó: humedad (H) materia seca (MS), proteína (PC), extracto etéreo (EE), cenizas (C), fibra cruda (FC), extracto libre de nitrógeno (ELN) bajo los criterios de la AOAC; b) Análisis fitoquímico: FEN, FLAV y AA fue mediante espectrometría (UV-vis); c) análisis morfológico (largo, ancho, grosor y peso) y d) la producción

de biomasa (PB) en base fresca (BF). Para el caso del NV las variables se midieron a los 45 días post- fertilización y en NF fue a los 363 días de su establecimiento y fertilización.

Para los objetivos 2 y 3: Determinar la humedad óptima de la deshidratación de nopal verdura y forrajero para la realización de un adecuado proceso de extrusión y Elaborar y caracterizar químicamente el extrusado de nopal verdura y forrajero, se tomó un pool de 12 kg de nopal al azar de toda la parcela del NV y NF, para conformar cuatro tratamientos (Trat): Trat-A= NV en BF; Trat-B= NF en BF; Trat-C= extrusado de NV y Trat-D= extrusado de NF, en cada tratamiento se evaluaron las variables del análisis bromatológico y fitoquímicos, descritas en el primer objetivo, así mismo se evaluó el comportamiento de la deshidratación mediante el análisis termogravimétrico.

Finalmente, para el objetivo 4: Establecer la vida de anaquel del extruido de nopal verdura y forrajero, se establecieron dos tratamientos: EXT-NV (extrusado de nopal verdura) y EXT NF (extrusado de nopal forrajero), con cuatro repeticiones de 20 g de extrusado de nopal/tratamiento, empaquetadas en bolsas ziploc. Todas las repeticiones se colocaron dentro de una cámara climática Ecoshel®, a temperatura de 45 ± 1 °C y 50 ± 5 %. Se evaluó la vida de anaquel acelerada tomando como referencia las variables de color, dureza, actividad de agua (AW), las cuales se analizaron a los 85, 125 y 165 días de vida de anaquel. La evaluación de los diferentes tratamientos para los análisis bromatológicos, fitoquímicos, morfológicos y vida de anaquel acelerada se realizaron en el laboratorio de investigación y desarrolló en el laboratorio internacional de Investigación e Innovación de nopal y Otras Cactáceas (LIINOCA), en el laboratorio de alimentos (LIDA) pertenecientes a la Facultad de Químico Farmacobiología (FQFB) de la UMSNH, mientras que el análisis termogravimétrico (TGA) se realizó en el departamento de cinética y catálisis de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química de la UMSNH. La información recabada se analizó mediante los modelos lineales generales y las diferencias entre tratamientos y variedades se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans), así como el análisis de componentes principales (ACP).

7. Capítulo 1. Efecto biofertilización del cultivo de nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) sobre variables bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas y su relación con la producción de biomasa

Resumen

El objetivo fue determinar el efecto de la biofertilización del cultivo de nopal verdura (NV; *O. ficus-indica*) sobre variables bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas y su relación con la producción de biomasa (PB). La investigación se llevó a cabo en dos parcelas de nopal. La primera, de nopal verdura (NV) y la segunda, de nopal forrajero (NF); las cuales dividieron en cuatro bloques; cada bloque con cuatro tratamientos. Los tratamientos (T) fueron: T1, fertilizante químico; T2, composta de bovinos; T3, fertilizante químico más bioinoculante y T4, composta de bovino más bioinoculante. Se evaluó la composición bromatológica, fitoquímica, morfología y PB/tratamiento. La información se analizó mediante los modelos de efectos fijos y análisis de componentes principales (ACP). Las diferencias entre tratamientos se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados a un $\alpha < 0.05$. Se encontró efecto del tratamiento ($p < 0.001$) sobre la composición bromatológica y fitoquímica y morfología del NV y NF. En el NV, la proteína cruda (PC) mostró mayores valores con el T1 ($p < 0.05$): 9.3%. Los flavonoides totales (FLAV) fueron mayores ($p < 0.05$) con el T1 y T4 (1.29 y 1.20 mg EQ/g, respectivamente). La PB fue mayor ($p < 0.05$) en T2 (25.0 kg) vs el resto de los tratamientos evaluados. En el caso del NF, el T4 mostró mayores valores ($p < 0.05$) de PC (9.5%) y Ceniza (24.6%). El T2 mostró mayores valores de fenoles totales (1.05 mg EAG/g), FLAV (9.4 mg EQ/g) y AA (30%) vs el resto de los tratamientos evaluados. En relación PB no se encontró diferencias entre tratamientos ($p > 0.05$), en donde los valores oscilaron de entre 12.0 a 15.1 kg. En cuanto al ACP, se encontró que, en el NV, el T1 y T2 produjeron mayor PB en BF (24.1 y 23.8 kg, respectivamente), con 81.8 y 75.2% de varianza explicada y en la variedad de NF, el T2 y T4 mostraron mayor PB en BF (14.18 y 18.86 kg, respectivamente), con 84.42 y 81.26% de varianza explicada. La fertilización del suelo con el composta y composta más bioinoculante son las estrategias viable para incrementar la PB del NV, debido a la mejora de los indicadores fisicoquímico, fitoquímico y morfológico.

Palabras clave: cactácea, bioinoculante, nutrición vegetal, productividad

7.1 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 y la utilización del nopal forrajero dependerá de la especie (animal) y la abundancia de cladodios de (9 a 45 kg) (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). 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 verdura y forrajero es una planta que se adapta a diversos agroecosistemas se requiere de estrategias para incrementar no sólo 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 (físicoquímicas, fitoquímicas o morfológicas) post-fertilización contribuyen de manera directa en la producción de biomasa del nopal verdura y forrajero bajo cultivos comerciales con suelos poco fértiles, arcillosos y franco-arenosos. Por ello, en este objetivo particular fue determinar el efecto de la biofertilización del cultivo de nopal verdura y forrajero sobre las variables bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas y su relación con la producción de biomasa.

7.2 Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en dos parcelas de nopal. La primera fue de nopal verdura (NV), ubicada en la localidad de La Concepción, municipio de Morelia, Michoacán (MICH), México, con una extensión de 750 m², a 2,150 msnm y en las coordenadas 19°42'N y 101°18'O, este sitio cuenta con un clima templado (16 a 19 °C) (INEGI, 2010) y un suelo de tipo arcilloso (Tabla 2) (WRB, 2006). La segunda parcela fue de nopal forrajero (NF), ubicada en la comunidad de La Trinidad de los Ángeles, Guanajuato (GTO), México, con una extensión de 772 m², a 1,687 msnm, en las coordenadas 20.19694°N y 101.69861°O, con temperaturas mínimas de 7 °C y máximas de 30 °C, con una precipitación pluvial promedio de 20 mm (INEGI, 2010) y un suelo franco arenoso (Tabla 2) (WRB, 2006).

Tabla 2. Composición físico- química (promedio ± DE) del suelo de la parcela de NV y NF evaluada.

Parcela/Variedad		
	MICH/NV	GTO/NF
Pd Físicos	Promedio	Promedio
PH1:2 (H ₂ O)	4.7 ± 0.2	7.9 ± 0.1
CEES (mS/cm)	0.1 ± 0.02	1.7 ± 0.2
Materia Orgánica%	3.2 ± 0.6	2 ± 0.3
Textura	Arcilloso	Franco arcilloso
Arcilla%	78.3 ± 5.4	13.6 ± 1.7
Arena%	7.4 ± 5.5	77.07 ± 2.6
Limo%	14.2 ± 2.6	9.28 ± 4.3
DAS(g/cm ³)	0.9 ± 0.03	1.1 ± 0.03
Micronutrientes (mg/kg de suelo)		
Fe ²⁺	42.5±14.9	12.6±1.7
Cu ²⁺	0.2±0.1	3.1±1.3
Mn ²⁺	31.93±6.9	13.0±6.3
B ³⁺	8.5±17.3	0.2±0.1
Aniones		
CO ₃ ²⁻	0	15.7±6.9
HCO ₃ ⁻	23.9±3.4	375.3±180.4
CL ⁻	36.1±3.5	241.5±46.0
P	7.7± 2.2	105.8± 28.6
Cationes		
Na ⁺	17.9±8.3	270.2±72.7
K ⁺	132.3± 42.4	519.7± 73.5
Ca ²⁺	612.2±135. 8	612.2±135. 8
Mg ²⁺	332.9±140.4	449.6±102.9

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

Pd=Parámetros; DE= Desviación estándar; CE= Conductividad eléctrica; CEES= Conductividad eléctrica del extracto de saturación; FA= Franco Arenosa; DAS= Densidad Aparente del Suelo; 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.

El diseño experimental en cada parcela consistió en bloques al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento. En el caso de NV se utilizaron 50 plantas madre (PMdr) /bloque/tratamiento y en el NF 68 plantas (PMdr)/ bloque/tratamiento, con una densidad de siembra de siembra de 3 y 21 PMdr/m, respectivamente (Tabla 3). El diseño utilizado se debió a que los terrenos de ambas parcelas no estaban uniformes antes de cultivar y al aplicar los tratamientos. En cuanto a la cosecha del NV esta realizó 45 días post-fertilización y en el NF se realizó a los 12 meses post-plantación y fertilización en cladodios del tercer nivel para su evaluación.

Tabla 3. Tratamientos de fertilización del NF y NV (*O. ficus-indica*).

Tratamiento	Componente	Suministro/planta/parcela	
		MICH/NF	GTO/NF
T1 (Fertilizante Químico)	Nitrato de calcio + sulfato de potasio + fosfato diamónico + urea + nitrato de magnesio.	51.6	51.6 g
T2 (Composta de bovino)	Composta de bovino.	2.6 kg	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)	51.6 g (Químico) + 200mL (1x10 ⁷ UFC mL ⁻¹)
T4 (Composta de bovino más bioinoculante)	Composta de bovino (T2) más bioinoculante	2.6 kg (Composta) + 200mL (1x10 ⁷ UFC mL ⁻¹)	5 kg (Composta) + 200mL (1x10 ⁷ UFC mL ⁻¹)

UFC= Unidades formadoras de colonias.

En los cuatro bloques en cada parcela se realizaron las mismas prácticas culturales utilizadas por los productores de las regiones: control de arvenses y poda. El riego de las plantas del NV fue por goteo (7,200 lts/riego) y en el caso del NF (14,400 lts/riego) fue mediante el riego rodado. En cada bloque/tratamiento/parcela se evaluaron las características bromatológicas,

fitoquímicas, morfológicas. Para el análisis bromatológico y fitoquímicos, se utilizaron 60 cladodios de NV (5.100 kg) y NF (38.850 kg) en base fresca (BF) por tratamiento/parcela.

Una vez que se realizó la cosecha de los cladodios que fueron usados para determinaciones bromatológicas, estos fueron llevados al Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos (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 min, se enjuagaron con agua destilada y se dejaron secar. Posteriormente, se utilizaron 60 cladodios de NV (84.2 g/cladodio en promedio) y 60 cladodios de NF (647.5 g/cladodio en promedio) seleccionados al azar; es decir, tres cladodios seleccionados aleatoriamente/tratamiento/bloque/parcela. 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 de NV y ≥ 637.5 g/cladodio de NF) se utilizó para la determinación bromatológica.

Análisis bromatológico

Las variables consideradas para el análisis bromatológico 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). Para la determinación de Hum (método AOAC 930.15) y MS se utilizaron 2.0 g de cladodio en BF/tratamiento/bloque/parcela, 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) dividido entre el peso de la muestra fresca multiplicado por 100. Para la determinación de PC (método AOAC 984.13) se utilizó una muestra de 0.7 g de cladodio en BS/tratamiento/bloque/parcela; muestras que se sometieron al método Kjeldahl. El EE (método AOAC 920.39) se determinó utilizando 2 g de cladodio en BS/tratamiento/bloque/parcela; muestras que fueron 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 AOAC 962.09) se utilizaron 2 g de cladodio en BS/tratamiento/bloque/parcela, muestras que sometieron al método de hidrólisis ácida y alcalina. Las CEN (método AOAC 942.05) se determinaron utilizando 2 g de cladodio en

BS/tratamiento/bloque/parcela; 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 formula: $ELN = 100 - (FC + PC + EE)$.

Preparación de los extractos etanólicos

Para la preparación de los extractos, se utilizaron 10 g de cladodio en BF/tratamiento/bloque/parcela, 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/parcela en 100 mL de alcohol al 96%, por 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 (fenoles totales) y FLAV (Flavonoides totales) y AA (porcentaje de inhibición del radical DPPH).

Análisis fitoquímicos

En el caso de las variables consideradas en el análisis fitoquímico, estas fueron FLAV, FEN y AA. 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, Perkin_Elmer, 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 AA se utilizó el método descrito por Camarena *et al.* (2018). Para ello, se diluyo 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, Perkin_Elmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Los resultados se expresaron en porcentaje de inhibición del radical DPPH.

Variables morfológicas

Las variables consideradas en el análisis morfológico fueron el largo (cm), ancho (cm), grosor (mm) y peso (g) del cladodio. El largo y ancho del cladodio se midieron con una regla de plástico graduada en cm y mm, 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 ± 0.05 g (TRUPER).

Biomasa en BF

La producción de biomasa (kg) producida en BF/tratamiento/bloque/parcela 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 (Nuevo León®).

Análisis de datos

La información recabada se analizó a través de modelos de efectos fijos y análisis de componentes principales (ACP) (Gallego y Araque, 2019). Para el primer 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) (Littell *et al.*, 1998) a un $\alpha < 0.05$. El modelo estadístico utilizado en el análisis de efectos fijos fue el siguiente:

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

Donde:

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

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 $j = \text{FQ, CB, FQ+I, CB+I}$;

V_k = Efecto fijo del k -ésimo variedad de nopal= NF y NV;

$T(V)_{j(k)}$ = Efecto fijo de la anidación del j -ésimo tratamiento dentro del k -ésima variedad.

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

El análisis de componente principales (ACP) se realizó para establecer la relación de las variables bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas con la biomasa producida en BF del NV y NF, en esta última variedad también se relacionaron parámetros edafológicos (materia orgánica y nitrógeno nítrico/tratamiento); 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; la segunda etapa, el ACP fue por tratamiento y variedad. Las pruebas utilizadas en ambas etapas fueron: Káiser, Meyer y Olkin (KMO), esfericidad de Bartlett y 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 cantidad de biomasa/variedad/tratamiento se determinó con los coeficientes de la regresión lineal múltiple generados a partir de las puntuaciones factoriales (Navarro *et al.*, 2010).

7.3 Resultados y discusión

De acuerdo con los resultados, en el NV, no se encontró ($p>0.05$) efecto de Bloque sobre las variables morfológicas ($p<0.05$). Mientras que, en el NF, el efecto de Bloque ($p<0.05$) afectó al peso, largo y grosor del cladodio (Tabla 4), más no al ancho del cladodio ($P>0.05$). Para el caso del efecto de Tratamiento, sobre la morfología del NV, este afectó a todas las variables evaluadas; pero, en el NF, solo el ancho y grosor no fueron afectados ($p<0.05$) por este factor de variación. Finalmente, en lo que respecta a la anidación Trat(variedad), en el NV solo afectó ($p<0.05$) al largo del cladodio y en el NF solamente afectó al ancho y grosor del cladodio ($p<0.05$) (Tabla 4).

En cuanto a las variables bromatológicas del nopal, el Bloque solo no tuvo un efecto significativo sobre ($p>0.05$) la MS y PC del NV; mientras que, en el caso NF, no tuvo efecto ($p>0.05$) en ninguna variable bromatológica (Tabla 4). En cuanto al efecto de Tratamiento sobre las variables bromatológicas del NV, solo el EE no hubo efecto significativo fue afectado

($p < 0.05$). Para el caso del NF, todas las variables bromatológico tuvieron efectos significativos ($p < 0.05$) (Tabla 4). En lo que respecta al efecto de la anidación tratamiento(variedad) en el NV y NF, todas las variables del análisis bromatológico tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) por este factor de variación (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis de efectos fijos para las variables morfológicas, bromatológicas y fitoquímicas del NV y NF.

F de V	Variedad													
	Verdura						Forrajero							
	Morfológicos													
	Peso	Largo	Ancho	Grosor		Peso	Largo	Ancho	grosor		Peso	Largo	Ancho	grosor
Bloque	NS	NS	NS	NS		**	**	NS	*		**	**	NS	*
Tratamiento	*	**	**	**		**	*	NS	NS		**	*	NS	NS
Trat(variedad)	NS	**	NS	NS		*	*	NS	NS		*	*	NS	NS
Análisis bromatológico														
	MS	PC	FC	EE	CEN	ELN	MS	PC	FC	EE	CEN	ELN		
Bloque	NS	NS	**	**	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
Tratamiento	**	**	**	NS	**	**	**	**	**	**	**	**		
Trat(variedad)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		
Análisis fitoquímicos														
	FEN	FLAV		AA			FEN	FLAV		AA				
Bloque	NS	**		**			NS	NS		NS				
Tratamiento	*	**		*			**	**		**				
Trat(variedad)	**	**		**			**	**		**				

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 ($p < 0.001$)

Finalmente, se observó que en las variables fitoquímicas de las variedades de nopal analizadas el Bloque solo afectó a FLAV y AA ($p < 0.05$) en el NV. Pero, en el NF, no se observó efecto de Bloque en ninguna de las variables fitoquímicas analizadas ($p > 0.05$) (Tabla 4). En cuanto al Tratamiento, este afecto a todas las variables fitoquímicas en ambas variedades ($p < 0.05$) (Tabla 3). Mientras que el efecto de tratamiento(variedad), en el NV y NF, afecto ($p < 0.05$) a todas las variables analizadas (FEN, FLAV y AA) (Tabla 4).

De acuerdo con lo anteriormente descrito, la heterogeneidad en el contenido de nutrientes y las características del suelo dentro de una parcela influye significativamente en la composición química, productividad y la calidad de los cultivos (Kintl *et al.*, 2024), mismo que durante el

crecimiento y desarrollo, provocan en las plantas cambios morfológicos adaptativos para optimizar la adquisición de recursos del entorno (Li *et al.*, 2024), estos cambios están estrechamente vinculados al desarrollo radicular (Zou *et al.*, 2014), las cuales desempeñan un papel crucial en la absorción de iones móviles (Wang *et al.*, 2013). No obstante, en suelos heterogéneos, el crecimiento radicular puede alterar de manera significativa la composición, estructura y productividad de la planta (Vallejo-Quintero, 2013), lo que podría explicar parcialmente el efecto del bloque y tratamiento sobre las variables analizadas en este estudio.

Características bromatológicas

En cuanto a los resultados del análisis bromatológico del NV (Tabla 5), se encontró en MS que el T4 mostró valores menores ($p < 0.05$) (9.9%) en comparación con el resto de los tratamientos, cuyos valores oscilaron de entre 10.7 y 11.1 %. En relación con PC, los cladodios de T3 presentó valores mayores ($p > 0.05$), 9.3%, respectivamente (Tabla 5). Para el caso de la FC (Tabla 5), no se encontraron diferencias entre promedios de manera contundente, puesto que, T3 (8.8%) y T4 (9.2%) presentaron valores similares entre sí ($p > 0.05$); pero, el valor de FC del T3 fue similar ($p > 0.05$) a T1 y T2 (valores de FC $\leq 8.3\%$). Con respecto a EE, no se observaron diferencias ($p > 0.05$) entre los cuatro tratamientos evaluados; cuyos promedios oscilaron entre 2.3 a 2.9% (Tabla 5). En el caso de las CEN, T3 presentó la menor ($p < 0.05$) cantidad (17.3%) en comparación con el resto de los tratamientos (Tabla 5). No obstante, el T2 y T4 presentaron valores de CEN similares ($p > 0.05$) entre sí; pero, mayores ($p < 0.05$) a T1 (19.3%). Finalmente, en el ELN, el T3 mostró valores más elevados ($p < 0.05$) en esta variable, ello en comparación con el resto de los tratamientos (Tabla 5).

En el caso del NF (Tabla 5), el T4 mostró mayores valores ($p < 0.05$) de MS (9.0%), PC (9.5%), y CEN (24.6%), ello en comparación con el resto de los tratamientos. En FC (Tabla 5), el T2 mostró mayores ($p < 0.05$) valores (7.9%) vs T1, T3 y T4 (6.7, 6.8, 7.6 %, respectivamente). Para el EE, el T3 mostró mayores ($p < 0.05$) valores (3.7 %), en comparación con el resto de los tratamientos, en donde los valores fueron de entre 2.0 a 3.3 60.6% (Tabla 5). Por último, referente a los valores de ELN, el T1 (58.6%) presentó mayores ($p < 0.05$) valores, con respecto al resto de los tratamientos, cuyos valores fueron de 53.2 a 56.0% (Tabla 5).

Características fitoquímicas

En relación con los resultados del análisis fitoquímico del NV (Tabla 5), 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, mayores ($p<0.05$) a T3 (Tabla 5). En lo que respecta a AA, el T4 presentó mayores ($p<0.05$) valores (14%) con respecto al resto de los tratamientos, cuyos valores oscilaron de entre 11.9 a 13.6% (Tabla 5). En el NF, el T2 mostró mayores valores de FEN (1.05 mg EAG/g), FLAV (9.4 mg EQ/g) y AA (30%) vs el resto de los tratamientos evaluados (Tabla 5).

Tabla 5. Medias de mínimos cuadrados para las variables del análisis bromatológico y morfológico del NV y NF de acuerdo con la anidación tratamiento (variedad).

Tratamientos									
Variable	T1		T2		T3		T4		±EE
	Variedad		Variedad		Variedad		Variedad		
	NV	NF	NV	NF	NV	NF	NV	NF	
Análisis bromatológico									
Materia seca (%)	10.7 ^{a1}	8.6 ^{a2}	11.1 ^{a1}	7.7 ^{b2}	10.7 ^{a1}	7.7 ^{b2}	9.9 ^{b1}	9.0 ^{c2}	0.17
Proteína cruda (%)	9.3 ^{a1}	8.4 ^{a2}	7.4 ^{c1}	9.0 ^{c2}	8.4 ^{b1}	8.3 ^{b1}	7.5 ^{c1}	9.5 ^{d2}	0.25
Fibra cruda (%)	7.9 ^{b1}	6.7 ^{a2}	8.3 ^{b1}	7.9 ^{b2}	8.8 ^{ab1}	6.8 ^{a2}	9.2 ^{a1}	7.6 ^{c2}	0.26
Extracto etéreo (%)	2.8 ^{a1}	3.3 ^{a1}	2.9 ^{a1}	2.7 ^{c1}	2.5 ^{a1}	3.7 ^{b1}	2.3 ^{a1}	2.0 ^{d1}	0.21
Extracto libre de nitrógeno (%)	60.6 ^{b1}	58.6 ^{a2}	59.0 ^{c1}	56.2 ^{c2}	62.9 ^{a1}	57.0 ^{b2}	59.3 ^{c1}	56.3 ^{d2}	0.4
Cenizas (%)	19.3 ^{b1}	22.7 ^{a2}	22.3 ^{a1}	24.2 ^{c2}	17.3 ^{c1}	24.1 ^{b2}	21.6 ^{a1}	24.6 ^{c2}	0.35
Fitoquímicas									
Fenoles totales (mg EAG/g)	0.60 ^{a1}	0.9 ^{a2}	0.56 ^{a1}	1.05 ^{c2}	0.56 ^{a1}	1.0 ^{b2}	0.61 ^{a1}	0.9 ^{d2}	0.01
Flavonoides (mg EQ/g)	1.29 ^{a1}	8.3 ^{a2}	1.17 ^{a1}	9.4 ^{c2}	1.05 ^{b1}	7.9 ^{b2}	1.20 ^{a1}	7.8 ^{b2}	0.07
AA (%)	13.6 ^{a1}	26.1 ^{a2}	12.3 ^{a1}	30.0 ^{b2}	11.9 ^{a1}	26.5 ^{a2}	14.0 ^{b1}	28.9 ^{c2}	0.74
Morfológicas									
Peso (g)	83.9 ^{b1}	650 ^{a2}	88.7 ^{a1}	638 ^{a2}	83.9 ^{b1}	629 ^{a2}	89.3 ^{a1}	696 ^{a2}	0.32
Largo (cm)	22.9 ^{a1}	24.4 ^{a2}	22.8 ^{a1}	22.3 ^{b1}	21.6 ^{c1}	23.6 ^{a2}	22.3 ^{b1}	23.3 ^{a2}	0.4
Ancho (cm)	8.8 ^{a1}	13.7 ^{a2}	8.4 ^{b1}	13.2 ^{a2}	8.4 ^{b1}	12.8 ^{a2}	8.5 ^{b1}	13.2 ^{a2}	0.22
Grosor (mm)	0.65 ^{a1}	1.55 ^{a2}	0.66 ^{b1}	1.7 ^{b2}	0.66 ^{b1}	1.5 ^{a2}	0.65 ^{a1}	1.6 ^{a2}	0.04
Biomasa (kg)	22.8 ^{b1}	13.7 ^{a2}	25.0 ^{a1}	15.1 ^{a2}	22.7 ^{b1}	12.0 ^{a2}	18.8 ^{c1}	12.2 ^{a2}	0.97

Literales a, b, c, d indican diferencias entre tratamiento dentro de variedad; Numerales 1,2 indican diferenciación entre variedad dentro de tratamiento; T1= Fertilizante químico; T2= Composta de bovino; T3= Fertilizante químico más bioinoculante; T4= Composta de bovino más bioinoculante; T5= Testigo; MS= Materia seca; AA= Actividad antioxidante.

Características morfológicas

En morfología de los cladodios de NV analizados (Tabla 5), 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. Referente al largo y ancho de los cladodios, el T1 presentó los cladodios con mayores ($p < 0.05$) longitudes (22.9 y 8.8 cm, respectivamente). Para el caso del grosor (Tabla 5), el T1 y T4, mostraron valores (0.65 mm en ambos) menores ($p < 0.05$) al T2 y T3 cuyos valores fueron iguales entre sí (0.66 mm). 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 T4 (18.8 kg/cosecha) (Tabla 5).

En cuanto al NF (Tabla 5), en el peso del cladodio no se observaron diferencias ($p > 0.05$) entre los cuatro tratamientos evaluados; cuyos promedios oscilaron entre 629 a 696g. Así mismo, en el ancho del cladodios, no se observó diferencias ($p > 0.05$) entre tratamientos, en los cuales los valores oscilaron entre 12.8 a 13.7 cm (Tabla 5). Referente al largo de los cladodios (Tabla 5) el T2 (22.3 cm) presentó menores ($p < 0.05$) valores de esta variable vs T1, T3 y T4 (24.4, 23.6 y 23.3 cm, respectivamente). Respecto al grosor del cladodio los T2 y T3 (0.66 mm en ambos) mostraron mayores ($p < 0.05$) valores, con respecto a T1 y T4 (0.65 mm, en ambos). En relación con la biomasa producida en BF/tratamiento no se encontró diferencias entre tratamientos ($p > 0.05$), en donde los valores oscilaron de entre 12.0 a 15.1 kg (Tabla 5).

Finalmente se encontró que la variedad de NV respondió mejor a los tratamientos (fertilizantes) aplicados en cuanto a las variables bromatológico (MS, PC, FC, EE, ELN y CEN) y a la producción de biomasa en BF. Sin embargo, en las variables fitoquímicas (FEN, FLAV y AA) y morfológicas (Largo, ancho, grosor y peso del cladodio) el NF mostró una mejor respuesta a los tratamientos (fertilizantes) aplicados (Tabla 5).

Diversos estudios determinan que la aplicación de fertilizantes químicos u orgánicos incrementan la producción, mejoran las cualidades nutricionales y la morfología de las plantas (Sharma y Chetan, 2017; Paharvi *et al.*, 2021). No obstante, la fertilización orgánica no solo cumplen con los requerimientos para llevar a cabo los procesos biológicos de las plantas, sino que, además, promueve la actividad microbiana del suelo, la capacidad de intercambio de aniones y cationes, así como el incremento en el contenido de materia orgánica y el carbono del

suelo (Julca-Otiniano *et al.*, 2006; Sharma y Chetani, 2017). Así mismo, los fertilizantes orgánicos mejoran la calidad y el rendimiento de los cultivos agrícolas, alcanzando o superando los resultados obtenidos con fertilizantes inorgánicos, sin generar impactos negativos en el medio ambiente (Kumar *et al.*, 2021). En este estudio, el fertilizante orgánico, como la composta de bovino, mostró mejoras en la morfología, en el contenido bromatológico y fitoquímico de los cladodios del nopal verdura y forrajero analizados. Sin embargo, factores adicionales, como la edad, la variedad, las condiciones climáticas y el estado hídrico, también pueden influir en las características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas de los cladodios de nopal verdura y forrajero (Zúñiga-Tarango *et al.*, 2009).

Es un hecho que la fertilización del cultivo del nopal (verdura y forrajero) incrementa la producción de biomasa, así como mejoras en morfología y en sus composiciones bromatológica y fitoquímica. Sin embargo, las mejoras de ciertas variables por efecto de la fertilización no permiten explicar con claridad -mediante el análisis estadístico de efectos fijos- el incremento de la biomasa de esta cactácea; por ello, se utilizó, el ACP, como herramienta estadística, para establecer los elementos bromatológicos, fitoquímicos o morfológicos de la planta relacionados con una mayor producción de biomasa de nopal forrajero y verdura post-fertilización, mismos que se discuten a continuación.

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

El ACP de la variedad verdura determinó que cuatro componentes explican el 78.4% de la variabilidad total de la biomasa producida ($p < 0.001$) independientemente del tratamiento (fertilización) que se le aplicó (Tabla 5). Los cuatro componentes obtenidos a través del ACP estuvieron conformados por ocho variables (Tabla 6). En el caso del ACP de la variedad forrajero estableció que tres componentes explican el 83.3% de la variabilidad total de la biomasa producía ($p < 0.001$) con independencia del tratamiento aplicado. Los tres componentes estuvieron conformados por nueve variables (Tabla 6).

Tabla 6. ACP para la determinación de la biomasa producida por el NV y NF (*O. ficus-indica*) independientemente del tipo de fertilizante (tratamiento) aplicado

ACP Nopal verdura			ACP Nopal forrajero					
Componentes (C)	VE	KMO	Componentes (C)	VE	KMO			
4	78.4	0.707**	3	83.3	0.761* *			
Regresión								
Gl	CM	R²	DW	Gl	CM	R²	DW	
4	887.2**	0.87	1.9	28	314.1**	0.86	2.16	
VE= varianza explicada; KMO= Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin; CM= cuadrados medios; Gl= grados de libertad; DW= Prueba de Durbin-Watson; ** = Altamente significativo								
Matriz de componente (C) rotado								
Componentes								
Variable	C1	C2	C3	C4	Variable	C1	C2	C3
Actividad A.	0.91				Fibra cruda	0.831		
Fenoles (T)	0.81				Tratamiento	0.944		
Clad/cor	0.93				Proteína cruda	0.93		
Largo		0.85			Ceniza	-0.867		
Ancho		0.91			Flavonoides (T)		0.91	
Tratamiento		-0.91			Nitrógeno nítrico		-0.92	
Extracto etéreo			0.81		Ancho			0.84
Materia seca				0.95	Largo			0.84

De acuerdo con los estimadores de la regresión (Tabla 7) se determinó que la biomasa producida por cada 50 plantas de NV y 68 plantas de NF en las parcelas evaluadas sería de 29.4 y 15.5 kg en BF/cosecha, independientemente del tratamiento utilizado. El ACP, determinó que el tipo de fertilizante utilizado (Componente 2 en NV y Componente 1 en NF) es elemento clave en los cambios de la producción de biomasa. Elementos que determinan que la deficiencia de la fertilización o una inadecuada combinación de esta evita mejoras en la morfología del nopal (largo y ancho), y en la composición bromatológica y fitoquímica y, en consecuencia, en la biomasa.

Tabla 7. Coeficientes de regresión múltiple por componente para la predicción de biomasa (Kg) de nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*)

Nopal verdura				Nopal forrajero			
Coeficientes.				Coeficientes			
Mod	β	T	Sig	Mod	β	T	Sig
Constante	21.03	74.83	0.000	Constante	13.99	25.71	.000
Componente 1 “Antioxidantes/producción”	4.56	16.16	0.000	Componente 1 “Bromatológicos/Fertilización”	0.52	0.96	0.337
Componente 2 “Morfología/tratamiento”	2.83	10.03	0.000	Componente 2 “Metabolitos secundarios/suelo”	1.52	2.79	0.006
Componente 3 “Energía”	-0.04	-0.14	0.889	Componente 3 “Morfología”	0.20	0.36	0.714
Componente 4 “Solidos”	0.98	3.49	0.001				
Biomasa	29.4 kg			Biomasa	15.5 kg		

Referente al Componente 1 del NV (FEN, ORAC y cladodios/ cosecha) y su contribución en la biomasa en BF, 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. Resultado similar con los 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) 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).

Respecto al ACP del NF, el Componente 1 conformado por T, PC, FC y CEN, se ha determinado que el uso de fertilizantes químicos y orgánicos juega un papel clave en la mejora del desarrollo y productividad del nopal, al proporcionar nutrientes esenciales que favorecen tanto el metabolismo como la estructura de la planta (Sharma y Chetani, 2017; Pahalvi *et al.*, 2021). A la par, la PC funge como suministro indirecto de nitrógeno, esencial en el crecimiento de tejidos y la creación de nuevos cladodios (de Wit y Fouché, 2021). En cuanto a la FC, se ha evidenciado que los elementos estructurales que lo componen como: celulosa, hemicelulosa y lignina propician a la planta una mayor rigidez a los tejidos vegetales y la creación de sistemas radiculares facilitan el transporte de agua y nutrientes a la planta (Sadrmanesh y Chen, 2019) y por consiguiente favorece el incremento en la productividad de la planta.

Por otro lado, las cenizas, que representan el contenido mineral del tejido vegetal, contienen elementos esenciales como calcio, potasio, fósforo y magnesio, los cuales son fundamentales para el desarrollo celular, la regulación osmótica y la fotosíntesis (Bhatla, y Lal, 2023), a la par estos minerales también tienen funciones al actúan como cofactores enzimáticos y participan en la síntesis de compuestos orgánicos, mejorando el metabolismo de la planta y en consecuencia, promueve el crecimiento de biomasa (Bhatla *et al.*, 2018).

Referente al Componente 2 (FLAV y NN) y su contribución en la biomasa en BF, Laoué *et al.* (2022), establecieron que los flavonoides actúan como antioxidantes, protegiendo a las células vegetales de los daños oxidativos causados por estrés abiótico, como radiación UV, sequía y salinidad, lo cual permite que las plantas mantengan procesos metabólicos estables y optimicen el crecimiento, y por consiguiente incrementa la productividad de los cultivos (Shah y Smith, 2020). En cambio, el nitrógeno nítrico en el suelo promueve la síntesis de proteínas, las cuales son necesarias en los procesos estructurales y metabólicos de las plantas, en este sentido, la

presencia en cantidades adecuadas de este componente en el suelo estimula el crecimiento y la producción de los cultivos (Hirsch, y Mauchline, 2015), elementos que se evidencian en el presente estudio. Por último, en cladodios con dimensiones mayores (ancho y largo) (Componente 3), puede incrementar la superficie fotosintética de la planta, lo que permite una mayor captación de luz solar, lo que genera un incremento en la producción de carbohidratos, los cuales son esenciales para el crecimiento y la producción de biomasa (Simkin *et al.*, 2022).

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

Se encontró que, en el NV, el 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 8). En el caso del T1, la producción de biomasa del NV 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 8). En el tratamientos con menor producción de biomasa (T4) observó que la menor biomasa se asoció al Componente 1 ($p<0.001$) y en el cual, su coeficiente (β_1) fue negativo: -4.54 de biomasas en BF, (Tabla 8).

En lo que respecta a la variedad de NF (Tabla 8), se encontró que T2 y T4 mostraron mayor producción de biomasas en BF (14.18 y 18.86 kg/cosecha, respectivamente), con 84.42 y 81.26% de varianza explicada, respectivamente. Conforme al T2 la producción de biomasa del NF se explicó con tres componentes ($p<0.001$): el Componente 1 conformado por: FC y FLAV; en tanto al Componente 2, que fue el que más aportó a la producción estuvo constituido por el grosor y ancho del cladodio y el Componente 3 lo conformaron el largo y numero de cladodios (Tabla 8). Finalmente, el T4 se explicó con tres componentes ($p<0.001$): el Componente 1 estuvo conformados por FC, FEN y Bloque; en el caso del Componente 2 estuvo constituido por el largo del cladodido y FLAV y el Componente 3 solo estuvo conformado por NClds.

Con base en el ACP de acuerdo con el tratamiento utilizado, se determinó que en el NV los tratamientos Químico y Composta fueron los que mostraron mayor influencia positiva en la producción de biomasa, pero en el NF los tratamientos Composta y Comp+ Bio fueron los que mejor comportamiento tuvieron en producción de biomasa.

En el NV, las variables que mostraron una contribución significativa a la producción de biomasa ($p < 0.001$) bajo el tratamiento con fertilizante químico (FQ) fueron: PC, FC, EE y FLAV; los cuales desempeñan roles clave como elementos estructurales, de transporte, energéticos y de defensa ante los radicales libres. Así, el suministró de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, K_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, FeSO_4 , MnSO_4 , ZnSO_4 , CuSO_4 y B (FQ), pudieron proveer a las plantas de NV los nutrientes faltantes en el suelo (Delgado *et al.*, 2024); incrementando los valores de dichos elementos y permitiendo una mayor biomasa, debido a que los minerales aportados por el FQ son liberados de manera más rápida, estos aumentan la tasa de crecimiento y en consecuencia la productividad general de las plantas (Sharma y Chetani, 2017). Sin embargo, este tipo de fertilizantes contribuye al desequilibrio biológico y reducción del microbioma del suelo (Muniz *et al.*, 2022).

En el caso del tratamiento con composta que mejoró ($p < 0.001$) la productividad del NV y NF, este fertilizante orgánico no solo mejora los nutrientes del suelo al ser fijados provisionalmente (no son disponibles para el cultivo posterior), también mejora la estructura del suelo, reduce la erosión de este, regula la temperatura del suelo y almacena más humedad (Singh y Longkumer, 2018). Además, son fuente de alimento para los organismos del suelo y suprimen las enfermedades edáficas (De Corato, 2020; Neher *et al.*, 2022). Aspectos que se reflejaron en las estructuras sólidas como lo es la FC y el largo, ancho y grosor del cladodio, así como en la formación de PC y MS y de defensa FLAV.

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (*Opuntia ficus-indica*) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

Tabla 8.ACP para la determinación de biomasa del NV y NF (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento (fertilización).

Tratamientos	Químico				Composta					Quim+Bio				Comp+Bio				
Variedad	NV	NF			NV	NF				NV	NF			NV	NF			
VE	75.2	93.1			81.8	84.42				79.9	83.8			74.4	81.26			
KMO**	0.82	0.69			0.74	0.56				0.71	0.56			0.7	0.57			
Componentes	C1	C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2	C3	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C3
MS	--	-	-	-	--	0.97	--	--	--	--	-0.72	--	--	--	--	--	--	--
FC	0.9	0.94	--	--	0.87	--	0.97	--	--	0.78	--	0.91	--	--	--	0.9	--	--
PC	0.96	0.92	--	--	0.83	--	--	--	--	0.9	--	0.98	--	--	0.94	--	--	--
EE	0.76	-0.96	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Largo	--	--	--	--	--	--	--	--	0.85	--	--	--	--	--	--	--	0.84	--
Grueso	--	--	--	--	--	--	--	0.8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Peso/C	--	--	-0.91	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Ancho	--	--	--	--	0.91	--	--	0.83	--	0.96	--	--	--	--	--	--	--	--
NClds	--	--	--	--	--	--	--	--	-0.8	--	--	--	--	--	--	--	--	0.98
PMdr	--	--	--	0.95	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
FLAV	0.97	--	--	-0.96	0.85	--	0.98	--	--	0.74	--	--	--	0.91	--	--	0.97	--
FEN	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.84	--	--	--	0.96	--	--
AA	--	--	0.97	--	--	--	--	--	--	--	--	0.91	--	--	--	--	--	--
MatOrg	--	--	0.93	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.98	--	--	--	--	--
Bloque	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.91	--	--	-0.9	--	--

ANOVAy								
R2	0.57	0.1	0.28	0.45	0.18	0.1	0.69	0.34
D-W	1.7	2.24	1.8	1.51	1.7	2.25	1.9	1.88

Coeficientes de Regresión								
β_0	23.6**	13.726**	21.7**	15.549**	21.3**	13.041**	21.5**	12.674**
Componente	β_1							
1	0.23**	0.579 ^{NS}	0.80*	1.081**	0.401*	0.402*	-4.54**	0.038 ^{NS}
2	--	-2.499*	1.56**	1.552**	0.043 ^{NS}	-1.513*	2.12**	4.145**
3	--	0.185 ^{NS}	--	-4.002**	--	--	--	2.146**
Biomasa (kg)	23.8	11.22	24.10	14.18	21.70	11.93	19.1	18.86

Referente al tratamiento Composta más bioinoculante aplicado al NF, las variables que mostraron una contribución a la producción de biomasa fueron: FC, FEN, FLAV y Largo, número de cladodios (NClds) y Bloque; mismo que representan elementos estructurales, de defensa y morfológicos. De esta manera, la combinación de ambos generó una acción sinérgica, puesto que, la composta enriquecen los suelos con materia orgánica, mejorando su estructura, capacidad de retención de agua y disponibilidad de nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio, mientras estimula la actividad microbiana (Rastogi *et al.*, 2023). Por su parte los microorganismos (bioinoculante) adicionados, fungen como fijadores de nitrógeno atmosféricos, solubilizadores de fosfatos, así como la producción de fitohormonas (axinas y giberelinas) y fortalecen a la planta ante procesos de estrés biótico y abiótico (Maitra *et al.*, 2022; Chaudhary *et al.*, 2022). Esta combinación de composta más bioinoculante, permite la absorción de los nutrientes de manera eficiente, mejora la salud de la planta, el desarrollo radicular y metabólico, y ello incrementa la productividad de la planta (Ahmed *et al.*, 2023).

7.4 Conclusión

La combinación de fertilización con composta de bovino y bioinoculante tiene efectos diferenciados en la producción de biomasa del nopal según el tipo de cultivo y las condiciones del suelo. Mientras que en el nopal verdura la composta de bovino es la opción más eficaz para mejorar las características bromatológicas y fitoquímicas, en el nopal forrajero, la fertilización con composta de bovino más bioinoculante potencia la biomasa y mejora atributos como la proteína, fibra, fenoles y actividad antioxidante. No obstante, se requieren evaluar diversas prácticas agronómicas adicionales como lo son la cantidad de agua y las condiciones ambientales para poder establecer dicha investigación.

7.5 Referencias

1. Ahmed, T., Noman, M., Qi, Y., Shahid, M., Hussain, S., Masood, H. A., Xu, L., Ali, H. M., Negm, S., El-Kott, A. F., Yao, Y., Qi, X., y Li, B. (2023). Fertilization of microbial composts: A technology for improving stress resilience in plants. *Plants*, 12(20), 3550. <https://doi.org/10.3390/plants12203550>
2. Bacarrillo-López, R., Pedroza-Sandoval, A., Inzunza-Ibarra, M. A., Flores-Hernández, A., y 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), 2-8. <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.2878>
3. Bautista-Zamora, D., Chavarro-Rodríguez, C., Cáceres-Zambrano, J., y 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), 122-132. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5496>
4. Bhatla, S. C., Lal, M. A., Kathpalia, R., y Bhatla, S. C. (2018). Plant mineral nutrition. En *Plant physiology, development and metabolism*, 37-81.
5. Bhatla, S. C., & Lal, M. A. (2023). Essential and functional mineral elements. In *Plant physiology, development and metabolism*, 25-49.
6. Boudet, A. A., Boicet, F. T., Durán, S. R., & 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), 37-42.
7. Camarena-Tello, J. C., Martínez-Flores, H. E., Garnica-Romo, M. G., Padilla-Ramírez, J. S., Saavedra-Molina, A., Álvarez-Cortes, O., & 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), 34. <https://doi.org/10.3390/antiox7030034>
8. Chaudhary, P., Singh, S., Chaudhary, A., Sharma, A., & Kumar, G. (2022). Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 930340. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.930340>

9. De Corato, U. (2020). Disease-suppressive compost enhances natural soil suppressiveness against soil-borne plant pathogens: A critical review. *Rhizosphere*, 13, 100192. <https://doi.org/10.1016/j.rhisp.2020.100192>
10. de Wit, M., & Fouché, H. (2021). Chemistry and functionality of *Opuntia spp.* nopal cladodes. In *Opuntia spp. Chemistry, bioactivity and industrial applications*, 259-285.
11. Delgado, A., Quemada, M., Mateos, L., & Villalobos, F. J. (2024). Fertilization with phosphorus, potassium, and other nutrients. In *Principles of agronomy for sustainable agricultura*, 415-437. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15885-8_16
12. Escalante-Estrada, J. A. S., Rodríguez-González, M. T., y Escalante-Estrada, Y. I. (2014). Tasa de crecimiento de biomasa y rendimiento de frijol en función del nitrógeno. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 2, 1-8. <https://www.somecta.org.mx/Revistas/somectavol.2.1/1.%20CYTAM-2014-02.%20J.%20ALBERTOESCALANTEESTRADA.pdf>
13. 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. <https://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>
14. FAOSTAT. (2020). *Estadísticas del sector agroalimentario*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.fao.org/statistics/es/>
15. FAOSTAT., 2020.” Estadísticas del sector agroalimentario”. Disponible en: <https://www.fao.org/statistics/es/>. Consultado: 23 de noviembre de 2023.
16. Faraz, R., Gokhale, M., y Gothwal, R. (2020). Callus extracts of *Oroxylum indicum* (L.) vent containing baicalein have in vitro antioxidant and antibacterial activities. *Biotechnología Vegetal*, 20(1), 51-62.
17. Flores, F. D. J., Martínez, M. E., Silva, L. R., y Rivas, R. (2021). Empleo de biofertilizantes para la mejora nutricional de la fresa. *Revista Agrícola - TecnoAgro*, 152, 29-30.

18. Gallego, L., y Araque, O. (2019). Variables de influencia en la capacidad de aprendizaje: Un análisis por conglomerados y componentes principales. *Información tecnológica*, 30(2), 257-264.
19. Hirsch, P. R., y Mauchline, T. H. (2015). The importance of the microbial N cycle in soil for crop plant nutrition. *Advances in Applied Microbiology*, 93, 45-71.
20. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Anuario estadístico del estado de Michoacán*. 45-50. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/16/16053.pdf
21. International Business Machines Corporation (IBM). (2017). *SPSS statistics for Windows* (Versión 25.0). IBM Corp., Armonk, NY, USA.
22. Jacobsen, S. E., Sørensen, M., Pedersen, S. M., y Weiner, J. (2015). Using our agrobiodiversity: plan-based solutions to feed the world. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 1217-1235. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0325-y>
23. Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.
24. Kintl, A., Šmeringai, J., Lošák, T., Huňady, I., Sobotková, J., Hrušovský, T., Varga, L., Vejražka, K., y Elbl, J. (2024). The effect of soil heterogeneity on the content of macronutrients and micronutrients in the chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Soil Systems*, 8(3), 75. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8030075>
25. Kumar, A., Maurya, B. M., y Raghuwanshi, R. (2021). The microbial consortium of indigenous rhizobacteria improving plant health, yield and nutrient content in wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Plant Nutrition*, 44, 1942-1956. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1884706>
26. Laoué, J., Fernandez, C., y Ormeño, E. (2022). Plant flavonoids in mediterranean species: A focus on flavonols as protective metabolites under climate stress. *Plants*, 11(2), 172.
27. Li, B., Deng, M., Pan, Y., Chen, W., He, T., Chen, L., Zheng, Y., y Rong, J. (2024). Response of the root morphological structure of *Fokienia hodginsii* seedlings to

- competition from neighboring plants in a heterogeneous nutrient environment. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1327322>
28. Littell, R. C., Henry, P. R., y Ammerman, C. B. (1998). Statistical analysis of repeated measures data using SAS procedures. *Journal of Animal Science*, 76, 1216-1231.
29. Lu, L., Wang, J., Zhu, R., Lu, H., Zheng, X., y Yu, T. (2015). Transcript profiling analysis of *Rhodosporidium paludigenum* mediated signaling pathways and defense responses in mandarin orange. *Food Chemistry*, 172, 603–612. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.097>
30. Maitra, S., Brestic, M., Bhadra, P., Shankar, T., Praharaj, S., Palai, J. B., Shah, M. M. R., Barek, V., Ondrisik, P., Skalický, M., y Hossain, A. (2022). Bioinoculants—Natural biological resources for sustainable plant production. *Microorganisms*, 10(1), 51. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010051>
31. Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., y Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1), 31-51. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003
32. Muniz, A. da S., Aragão, L. de O., y de Souza, S. L. Q. (2022). Contaminação química de alimentos vegetais e a saúde: Agricultura convencional x orgânica. *Revista Sustinere*, 10(2), 434–450.
33. Navarro, C. J. M., Casas, C. G. M., y 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), 199-230. <https://doi.org/10.15517/rmta.v17i2.2128>
34. Neher, D.A., Hoitink, H.A., Biala, J., Rynk, R., y Black, G. (2022). Compost use for plant disease suppression. In *The Composting Handbook*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 847–878
35. Ordaz, O. G., Juárez, C. A., Portillo, M. L., Pérez, S. R. E., y 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), 1027-1041. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4932>
36. Paharvi, H. N., Rafiya, L., Rashid, S., Nisar, B., y Kamili, A. N. (2021). Chemical fertilizers and their impact on soil health. En Dar, G. H., Bhat, R. A., Mehmood, M. A., y Hakeem, K. R., *Microbiota and biofertilizers*, 2, 1-30. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1
37. 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.
38. Ramírez-Castaño, A. P., León, F. J., Alfaro-Wisaquillo, Y. M., Álvarez-Quintero, R. M., y Zapata-Ocampo, P. A. (2023). Morfometría de cladodios de nopal cultivado en Santander, Colombia: Estudio exploratorio. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10(2), 88-101. <https://doi.org/10.23850/24220582.5737>
39. Rastogi, M., Verma, S., Kumar, S., Bharti, S., Kumar, G., Azam, K., y Singh, V. (2023). Soil health and sustainability in the age of organic amendments: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 2088-2102.
40. Rives-Castillo, S. C., Correa-Pacheco, Z. N., Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., Schettino-Bermúdez, B. S., Ortega-Gudiño, P., y 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), 403-416. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i5.2516>
41. 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. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-mexicano> (Consultado el 28 de noviembre de 2023).
42. Sadrmanesh, V., & Chen, Y. (2019). Bast fibres: structure, processing, properties, and applications. *International Materials Reviews*, 64(7), 381-406.
43. SAS Institute Inc. (2010). Correlation of Pearson. En *Chapter 2. The CORR Procedure. Base SAS® 9.2 Procedures Guide: Statistical Procedures*, 3, 3-59. Cary,

- NC: SAS Institute Inc. [https://datajobs.com/data-science-repo/SAS-Stat-Guide-\[SAS-Institute\].pdf](https://datajobs.com/data-science-repo/SAS-Stat-Guide-[SAS-Institute].pdf)
44. Sharma, A., y Chetani, R. (2017). A review on the effect of organic and chemical fertilizers on plants. *International Journal of Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5, 677-680.
45. SIAP. (2023). ¡Y el nopal ingresó en la dieta simbólica y real de los mexicanos! Cifras y datos sobre esta ancestral planta. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/articulos/y-el-nopal-ingreso-en-la-dieta-simbolica-y-real-de-los-mexicanos> (Consultado el 23 de noviembre de 2023).
46. Simkin, A. J., Kapoor, L., Doss, C. G. P., Hofmann, T. A., Lawson, T., y Ramamoorthy, S. (2022). The role of photosynthesis-related pigments in light harvesting, photoprotection, and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynthesis Research*, 152(1), 23-42.
47. Singh, R. K., y Longkumer, T. E. (2018). Compost: the black gold. Krishi Vigyan Kendra–Phek, ICAR–NRC on Mithun, Porba, Phek, *Nagaland*, 112.
48. Stalikas, C. D. (2007). Extraction, separation, and detection methods for phenolic acids and flavonoids. *Journal of Separation Science*, 30(18), 3268-3295. <https://doi.org/10.1002/jssc.200700261>
49. Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. D. L., y 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), 1129-1142. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i5.604>.
50. Vallejo-Quintero, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83-99.
51. Wang, X., Tang, H. L., y Shen, J. B. (2013). Root responses of maize to spatial heterogeneous nitrogen and phosphorus. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 19, 1058–1064.

52. World Reference Base for Soil Resources. (2006). *A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Reports, 103*. FAO, Roma.
53. Zou, X. H., Wu, P. F., Chen, N. L., Wang, P., y Ma, X. Q. (2014). Chinese fir root response to spatial and temporal heterogeneity of phosphorus availability in the soil. *Canadian Journal of Forest Research, 45*, 402–410. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0384>
54. Zúñiga-Tarango, R., Orona-Castillo, I., Vázquez-Vázquez, C., Murillo-Amador, B., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J.D., García-Hernández, J.L. y Rueda-Puente, E. 2009. Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en diferentes tratamientos de fertilización. *Journal of the Professional Association for Cactus Development. 11*(3), 53-68.

8. Capítulo 2. Elaboración y caracterización del extrusado del nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) y su efecto en sus características nutrimentales

Resumen

El objetivo fue caracterizar el proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) y su efecto sobre sus características nutrimentales. En la presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH. En el cual se utilizaron seis kg de nopal verdura (NV) y seis kg de nopal forrajero (NF) (*O. ficus-indica*) con una edad promedio de tres meses. Con los 12 kg de nopal se conformaron cuatro tratamientos (T): Trat-A (n= 3.0 kg), NV en BF; Trat-B (n= 3.0 kg), NF en BF; Trat-C (n= 3.0 kg), extrusado de NV y Trat-D (n= 3.0 kg), extrusado de NF. Se evaluó la composición bromatológica, fitoquímica y la pérdida de peso mediante el análisis termicogavimétrico/tratamiento. Se encontró que todos los promedios para las variables bromatológicas fueron diferentes ($p < 0.05$) en BF y extrusado dentro de ambas variedades de nopal, únicamente fue igual ($p > 0.05$) el promedio de extracto libre de nitrógeno (ELN) (56.3 y 56.4%, respectivamente) en el NV. Respecto a la comparación de promedios entre variedades todos fueron diferentes ($p < 0.05$) tanto en BF como en extrusado. Se observó un mayor valor en proteína cruda (11.4 y 12.5%) ELN (56.3 y 56.4%) y ceniza (22.4 y 24.4%) en la variedad de NV para BF y extrusado, mientras que los mayores valores de fibra cruda (12.8 y 9.4%) y extracto etéreo (3.5 y 2.3%) se lograron en el NF tanto en BF como extrusado. En el análisis fitoquímicos, no se encontró efecto ($p > 0.05$) de variedad y tratamiento sobre Fenoles (1.95 a 2.16 mg/EAF/g) y Flavonoides totales (0.93 a 1.25 mg/EQ/g). En la actividad antioxidantes, no se encontró efecto de variedad, pero si se encontró efecto ($p < 0.05$) de tratamiento: 22.6 y 17.4%, para el extrusado de NF y NV, respectivamente. Finalmente, las curvas calorimétricas del nopal en BF y extrusado, presentan comportamientos similares en la pérdida de peso, obteniendo 90% de pérdida para ambas muestras, sin embargo, el NF requiere menor tiempo para alcanzar una pérdida máxima. El proceso de extrusión mejora las propiedades nutricionales y biofuncionales del nopal en BF.

Palabras clave: extrusión, base fresca, bromatológico, biofuncional.

8.1 Introducción

En la actualidad, la alimentación está en constante cambio, pasando de cubrir no sólo las necesidades de mantenimiento y supervivencia sino a convertirse en una herramienta clave para asegurar el bienestar y salud global (FAO, 2018). Por ello, actualmente las preferencias de los consumidores están orientadas hacia los alimentos que ofrezcan beneficios adicionales, más allá de su valor nutritivo básico (Torres-Ponce *et al.*, 2015), tales como los alimentos funcionales, los cuales cuentan con elementos nutraceuticos, compuestos bioactivos encontrados en las plantas, que debido a sus propiedades antioxidantes ayudan a prevenir enfermedades (Birute *et al.*, 2009).

Dentro de los alimentos funcionales, surge como opción el nopal (*O. ficus-indica*), utilizado tanto como verdura en la alimentación humana como forraje para animales, ello debido a que es rico en carotenoides, ácido ascórbico, fenoles y flavonoides, compuestos fitoquímicos con capacidad antioxidante (El-Mostafa *et al.*, 2014). No obstante, a pesar de que el nopal es un alimento funcional, posee una desventaja, que, una vez cosechados los cladodios, tienen una vida de anaquel corta; debido a su alto contenido de agua y bajo pH (Contreras, 2012). Además, se requiere de amplios lugares para su almacenamiento en fresco y mantener temperaturas de entre 4° y 6° C, ya que, si estas se elevan, aumenta su descomposición reduciendo su vida de anaquel (Alam-Eldein *et al.*, 2021). Una alternativa a este problema es la extrusión, el cual es un proceso ampliamente utilizado en la industria alimentaria para mejorar las propiedades de los alimentos (Vega *et al.*, 2023).

Recientemente, se ha determinado que el proceso de extrusión mejora el valor nutricional y reduce los factores anti nutricionales de los productos, además de mejorar la digestibilidad de las proteínas y la actividad antioxidante (Choton *et al.*, 2020). No obstante, aún no se ha determinado los cambios que se puedan producir en el nopal y tampoco en los compuestos fitoquímicos, por ello, el objetivo de la presente investigación fue elaborar y caracterizar el extrusado de nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) y su efecto sobre las características nutrimentales del producto.

8.2 Materiales y métodos

Para el logro del objetivo, en la presente investigación se utilizaron seis kg de nopal verdura y seis kg de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) seleccionados al azar, con una edad promedio

de tres meses en ambas variedades, mismos que se obtuvieron en las parcelas mencionadas en la primera etapa de la investigación. Recolectados los cladodios fueron llevados al Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH en donde fueron procesados a través de la técnica de extrusión en base fresca (BF). Con los 12 kg de nopal se conformaron cuatro tratamientos (T): Trat-A (n= 3.0 kg), NV en BF; Trat-B (n= 3.0 kg), NF en BF; Trat-C (n= 3.0 kg), extrusado de NV y Trat-D (n= 3.0 kg), extrusado de NF.

En el proceso de extrusión del nopal se utilizó 3.0 kg de nopal verdura en BF (Trat-C) y 3.0 kg de nopal forrajero en BF (Trat-D). Los cladodios de nopal para el Trat-C y Trat-D fueron cortados en porciones aproximadas de 2 cm³, posteriormente se introdujeron las muestras en un molino (Rhino MOCA-12) para su posterior trituración. Una vez obtenida la pasta del nopal molido, esta se distribuyó en tres bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio desechables (Ekco®) de manera uniforme y con un espesor aproximado de 1 cm. Para después colocarse en la deshidratadora (horno con ventilación forzada) con capacidad para 12.0 kg, misma que fue programada a 50°C y a 20% de humedad.

Durante el proceso de deshidratación, la pasta de nopal se monitoreó cada 30 minutos hasta que ésta alcanzó una humedad de 35 a 37%; humedad óptima para realizar el proceso de extrusión de acuerdo con las pruebas piloto previas. Una vez que se obtuvo la humedad $\leq$ 37% en la pasta de nopal se sacó de la deshidratadora y se procedió con el proceso de extrusión, utilizando para ello un molino (Rhino MOCA-12) específico para dicho proceso. Una vez obtenido el extrusado de nopal en BF se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevaron a la deshidratadora hasta alcanzar una humedad $< 12\%$ (DOF: NMX-Y-098-SCFI-2018).

Las variables evaluadas en cada tratamiento fueron las variables pertenecientes al análisis bromatológico (PC, FC, EE, CEN y ELN) descritas en la metodología del primer capítulo, así como las variables fitoquímicas (FEN, FLAV y AA). Estas determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH.

Análisis termogravimétrico (TGA)

El estudio de TGA se realizó en un equipo SDT Q6000 Perkin_Elmer. El peso de las muestras de nopal verdura y forrajero en BF y extrusado fueron de 100 ± 5 mg, misma que se colocó en un crisol de alúmina bajo una atmósfera de oxígenos con un flujo de 30 ml/min. La muestra fue calentada a temperatura ambiente (25 °C) hasta los 50°C, con una rampa de 10 °C/min. Con la intención de determinar la descomposición del nopal verdura y forrajero bajo el proceso de extrusión. Posteriormente, los resultados obtenidos (base de datos) se graficaron mediante el programa informático Origin®.

Análisis de datos

La información recabada se analizó a través de los modelos lineales generales y las diferencias entre tratamientos y variedades se obtuvo mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Litell *et al.*, 1998). El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + V_i + P_j + P(V)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} = PC, FC, EE, CEN, ELN, FEN, FLAV y AA;

μ = promedio general;

V = Efecto fijo de variedad, con la i ésimo variedad = verdura y forrajero;

Efecto fijo del proceso, con el j ésimo proceso = BF y Extruido;

Efecto de la anidación proceso(variedad) =, con la i ésimo variedad = verdura y forrajero y el j ésimo proceso = BF y Extruido.

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

8.3 Resultados y discusión

Los resultados mostraron que todos los promedios para las variables bromatológicas fueron diferentes ($p < 0.05$) en BF y extrusado dentro de ambas variedades de nopal, únicamente fue igual ($p > 0.05$) el promedio de ELN (56.3 y 56.4%, respectivamente) en el NV. Respecto a la comparación de promedios entre variedades todos observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) tanto en BF como en el extrusado. Se observó un mayor valor para PC (11.4 y 12.5%) ELN (56.3 y 56.4%) y CEN (22.4 y 24.4%) en la variedad de NV para BF y extrusado,

mientras que los mayores valores de FC (12.8 y 9.4%) y EE (3.5 y 2.3%) se lograron en el NF tanto en BF como extrusado (Tabla 9).

Tabla 9. Medias de mínimos cuadrados para ($\pm$ error estándar) para las variables bromatológicas (g/100g BS) de nopal verdura y forrajero de acuerdo con el tratamiento.

Tratamientos					
Variable	Nopal verdura		Nopal Forrajero		±EE
	BF	Extrusado	BF	Extrusado	
PC	11.4 ^{a1}	12.5 ^{b1}	9.4 ^{a2}	11.7 ^{b2}	0.15
FC	7.4 ^{a1}	5.4 ^{b1}	12.8 ^{a2}	9.4 ^{b2}	0.24
EE	2.4 ^{a1}	1.4 ^{b1}	3.5 ^{a2}	2.3 ^{b2}	0.08
ELN	56.3 ^{a1}	56.4 ^{a1}	51.3 ^{a2}	52.7 ^{b2}	0.38
CEN	22.4 ^{a1}	24.4 ^{b1}	22.9 ^{a2}	23.9 ^{b2}	0.10

BF= base fresca.

El proceso de extrusión del NV y NF modificó químicamente las propiedades de esta cactácea, puesto que los valores de tratamiento en BF (Trat-A y Trat-B) así lo demuestran. Aspectos que, concuerdan con diversas investigaciones (Contreras-Padilla *et al.*, 2012; De Santiago *et al.*, 2018; Ortiz *et al.*, 2022; Pérez-Viveros *et al.*, 2024) en las cuales someten al nopal (*O. ficus-indica*) a diversos procesamientos térmicos y mecánicos, estos autores reportan cambios en sus componentes químicos y fitoquímicos, principalmente en el contenido de proteína, fibra y minerales. No obstante, las investigaciones se han desarrollado con diferentes variedades y edades de nopal; mientras que en esta investigación se utilizaron cladodios de 90 días de edad de NV y NF (*O. ficus-indica*).

En cuanto a los valores de proteína específicamente en los Trat-C y Trat-D (12.5 y 11.7%), estos fueron mayores a los encontrados por Hernández-Urbiola *et al.*, (2011) (7.78 g/100g ^{BS}), Contreras *et al.*, (2012) (4-5 g/100g ^{BS}) en cladodios de una edad ≥ 90 y secados a una temperatura de entre 45 a 50 °C. Al respecto, Hernández-Becerra *et al.* (2022), menciona que el contenido químicos del nopal, entre ellos la proteína se modifica en función de la madurez y la variedad. Aunado a ello, Alam *et al.*, (2015) determinaron que el proceso de extrusión no solo incrementa el contenido proteico, sino que además mejora la disponibilidad de este. En el caso del contenido de FC, Pérez-Viveros *et al.* (2024), establecieron que el proceso de extrusión en harina de nopal (*O. ficus-indica*) modifica los valores de fibra, es decir la extrusión incrementó (4.99 a 10.38 %) el contenido de fibra soluble y disminuyó (36.91 a

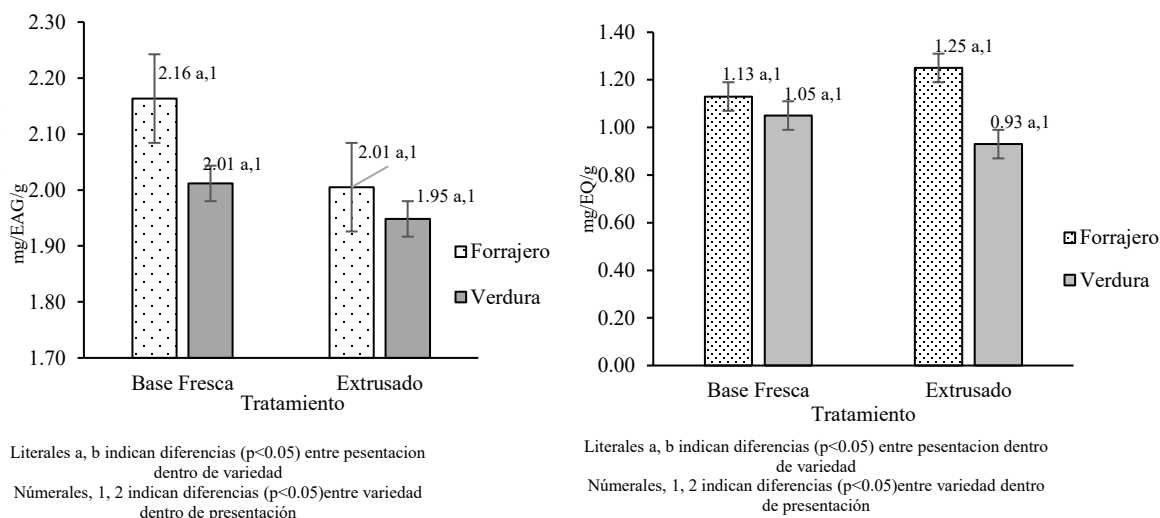
32.30 %) el contenido de fibra insoluble. Al respecto, Beyá-Marshal *et al.*, 2022, determinan que, la temperatura de deshidratación del nopal y la edad es un factor en la disminución de fibra soluble e insoluble, puesto que reportaron valores de 43 a 32 % y de 43 a 42 % en cladodios de 60 y 90 deshidratados a 40 y 60 grados, respectivamente. Valores mayores a los reportados en esta investigación

Por otro lado, la reducción de FC y EE durante la extrusión pudo haber generado un efecto de concentración, lo que podría explicar el aumento aparente de PC. Al respecto Williams *et al.* (2019), menciona que el proceso de extrusión rompe los enlaces de la pared celular de la planta, lo que reduce el contenido de fibra insoluble y aumenta las fibras solubles, aspecto que puede explicar la reducción en la FC del extrusado, puesto que la FC, está conformada por principalmente por fibra insoluble. Además, las posibles interacciones proteína-fibra, como la formación de enlaces covalentes, pueden haber afectado la disponibilidad de ciertos compuestos sin modificar realmente el contenido proteico (Kucki *et al.*, 2014). Este fenómeno ha sido reportado en productos extruidos donde la reducción de componentes estructurales incrementa la concentración relativa de otros nutrientes, como la proteína (Pérez-Viveros *et al.*, 2024). Aunado a lo anterior, Maina *et al.* (2021), establecen que el proceso de extrusión desestructura el alimento y la matriz de la fibra dietética, lo que a su vez genera una reducción en sus cantidades y sus propiedades.

Por otro lado, diversos autores mencionan que el incremento de la PC durante el proceso de extrusión en ambas variedades de nopal puede atribuirse a otros factores, relacionado principalmente con las condiciones térmicas y mecánicas del proceso. Es decir, que, durante el proceso de deshidratación y extrusión, existe una pérdida de líquidos, lo que provoca una concentración de los componentes sólidos, como la proteína (Bisharat *et al.*, 2013). Además, Ruiz-Gutiérrez y Quintero-Ramos (2021), establecen que el proceso de extrusión puede provocar la desnaturalización de proteínas, debido a las temperaturas prolongadas y a las altas presiones que se aplica en dicho proceso, esta desnaturalización puede exponer grupos funcionales que anteriormente estaban protegidos por estructuras más complejas, causando que estas sean menos detectables (Vallons y Arendt, 2010; Wang *et al.*, 2017). Aunado a lo anterior, el calor prolongado y la fuerza de cizalla durante el proceso de extrusión pueden

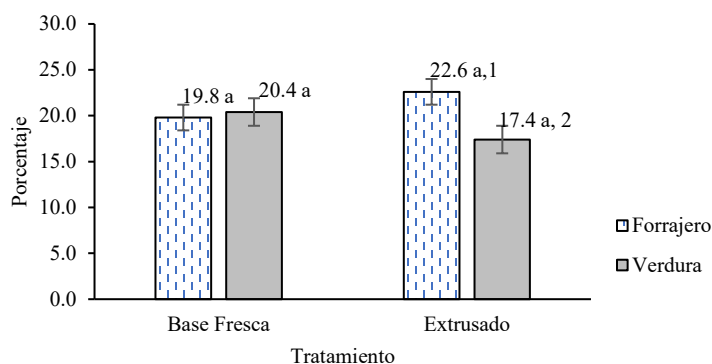
romper enlaces entre proteínas y otros compuestos (polisacáridos, lípidos, fenoles) (Qiu *et al.*, 2024), lo que podría incrementar la cuantificación de esta durante su medición.

Referente a las cenizas, De Santiago *et al.* (2018), reportaron valores inferiores a los encontrados en la presente investigación, de 0.5 g/100g BS, en cladodios de nopal (*O. ficus-indica*) sometidos a diferentes procesos de calentamiento (BF, hervido, microondas, asado), y en los cuales no encontraron diferencias entre sus tratamientos. Así mismo, Rodríguez-García *et al.* (2007), reportaron menores valores en ceniza de 19.61 % en cladodio $\geq$ a 90 días, deshidratados en un horno con aire caliente a 40 °C, también establecen que el contenido de cenizas incrementó con la edad de los cladodios. A pesar de la importancia de los minerales (Cenizas) para la salud, son pocos los estudios que han investigado la estabilidad de los minerales durante la extrusión, ello debido a que son termoestables y es poco probable que se pierdan durante dicho proceso, además se ha comprobado que la extrusión mejora la absorción aparente de la mayoría de los minerales, esta mayor absorción se puede explicar por el efecto positivo de la extrusión en la reducción de factores antinutricionales (fitatos, taninos condensados) (Singh *et al.*, 2007).



Gráfica 1 y 2. Medias de mínimos cuadrados para ($\pm$ error estándar) para fenoles y flavonoides totales de nopal verdura y forrajero de acuerdo con el tratamiento.

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas



Literales a, b indican diferencias ($p < 0.05$) entre presentación dentro de variedad
Números, 1, 2 indican diferencias ($p < 0.05$) entre variedad dentro de presentación

Gráfica 3. Medias de mínimos cuadrados para Actividad antioxidante del nopal (*O. ficus-indica*) verdura y forrajero de acuerdo con el tratamiento.

En el análisis fitoquímico, de la presente investigación se pudo observar que los valores de flavonoides totales son mayores en el nopal en BF a los reportados por Slimane *et al.* (2024), Khaled *et al.* (2024), de 0.52 y 0.13 mg EQ/g, pero menores a los reportados por Manzanarez-Tenorio *et al.* (2023) quienes encontraron valores de 2.42 mg EQ/g, pero similares a los encontrados por Benayad *et al.* (2015), quienes reportaron valores de entre 0.78 a 1.57 mg EQ/g. Referente a los fenoles totales, Guevara-Figueroa *et al.* (2010), Astello-García *et al.* (2015) Missaoui *et al.* (2020), Aparicio-Ortuño *et al.* (2024), reportaron en cladodios mayores a los 60 días, mayores valores a los encontrados en la presente investigación (6.8, 18.0, 14.4, 20.52 mg EAG/g, respectivamente). Finalmente, en la actividad antioxidante, Carrillo-Verástegui *et al.* (2024) reportaron mayores valores (58.5%) con respecto a los encontrado en esta investigación.

Pese a que, Hernández-Castillo *et al.* (2016), mostraron menores valores a los encontrados en esta investigación, encontraron que la actividad antioxidante del nopal incrementa al aumentar la temperatura de su procesamiento, mismas que fueron de 75, 100 y 125 °C (1.9, 8.0 y 10.67 %, respectivamente), comportamiento similar a lo encontrado. En anteriores investigaciones, se ha determinado que los pigmentos de color oscuro (color marrón) se producen durante el procesamiento térmico de los alimentos (Sharma y Gujral, 2011; Xu y Chang, 2008) debido al pardeamiento de Maillard, dichos pigmentos tienen actividad antioxidante (en particular las melanoidinas), producto de la degradación de fibra (Manzocco, *et al.*, 2001), aspecto que se pudo observar en la Tabla 8. En este sentido, el aumento de la

actividad antioxidante podría explicarse por la formación de pigmentos de pardeamiento de Maillard que mejoraron la actividad antioxidante (Rufian-Henares y Delgado-Andrade, 2009) de los extruidos en comparación con sus muestras de control correspondientes.

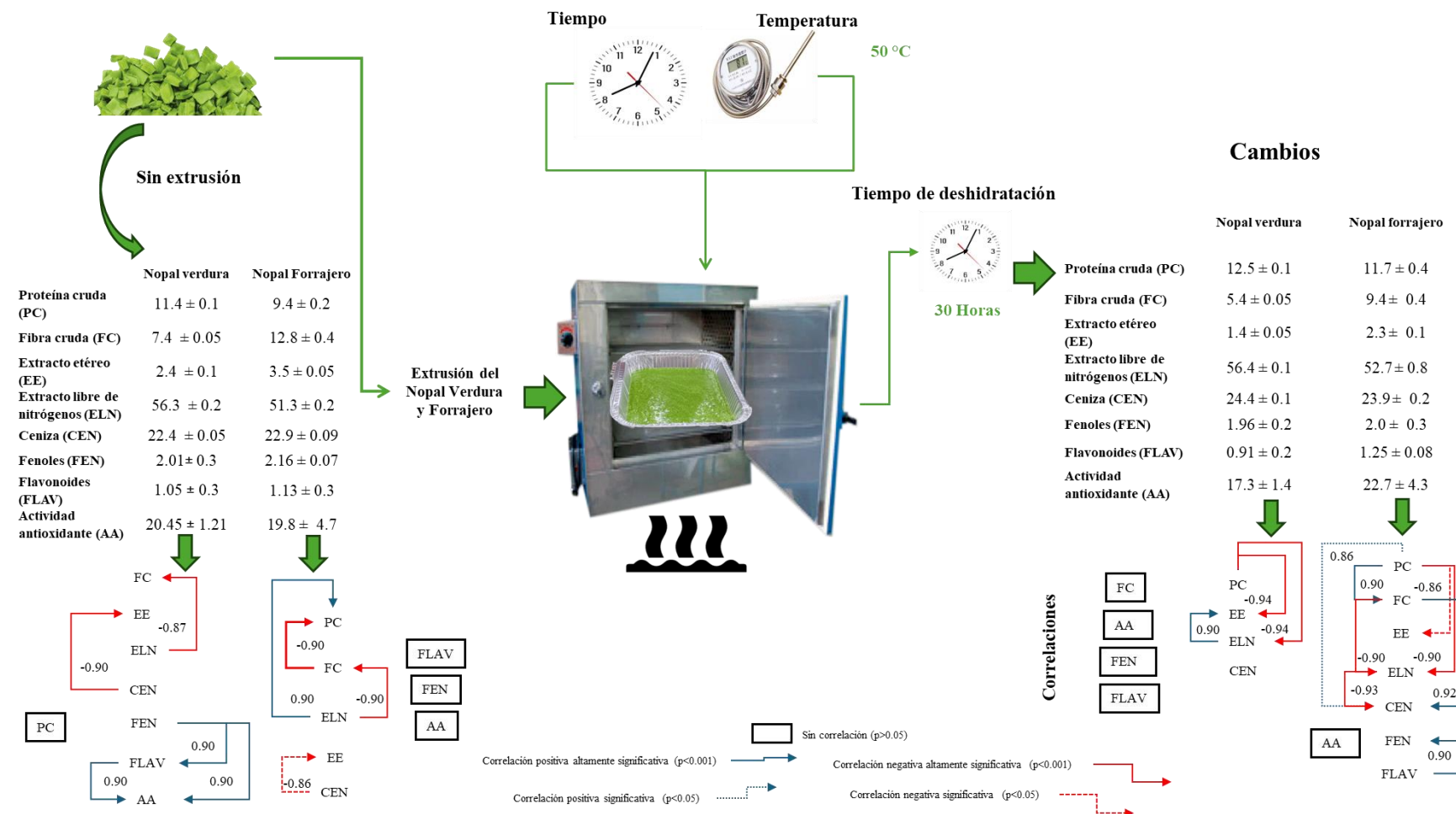
Referente a las correlaciones (r) entre los componentes bromatológicos y fitoquímicos dentro del tratamiento analizado (Esquema 1), los cuales permitieron caracterizar esquemáticamente el proceso de extrusión del NV y NF, se pudo establecer que, en los tratamientos los compuestos fitoquímicos (FEN, FLAV y AA) no se correlacionaron entre algunos componentes bromatológicos de los diferentes tratamientos. Considerando a los tratamientos A y B sin extruir (testigos) como referentes, se determinó que al someter al NV al proceso de extrusión y deshidratación a 50 °C por 30 horas, se redujo el número de correlaciones, pasando de cinco correlaciones entre las variables bromatológicas y fitoquímicas a tres correlaciones solo entre variables bromatológicas.

Caso contrario en el NF (Esquema 1), en el cual aumentaron el número de correlaciones (de 4 a 8), en donde solo la AA no se correlacionó ($p > 0.05$) con el resto de las variables. Para el caso de la PC (Esquema 1), este compuesto se correlacionó (r), solo en el Trat-B de forma positiva con ELN (0.90), pero en los tratamientos C y D fue de manera negativa ($p < 0.05$) con EE (-0.94 y -0.86, respectivamente), ELN (-0.94 y -0.90, respectivamente). No obstante, la PC en el Trat-D se correlacionó ($p < 0.05$) positivamente con CEN (0.86) y FC (0.93). Además, se encontró que el ELN (Esquema 1) se correlacionó ($p < 0.05$) en todos los tratamientos analizados, de manera negativa y valores altos (≥ -0.90) con FC, PC y CEN en todos los tratamientos analizados, pero en el Trat-C el ELN solo correlacionó ($p < 0.05$) positivamente con EE (0.90).

La modelación esquemática de los cambios de correlaciones entre componentes bromatológicos y fitoquímicos del NV y NF, de acuerdo con el proceso de extrusión, permitió establecer que este proceso cambia no solo las cantidades de los componentes antes mencionados, sino que, además, su asociación ($p < 0.05$) entre los mismos (Esquema 1). De esta manera, la extrusión en general dio lugar a: 1) mayor contenido de PC, CEN y ELN, pero, menor cantidad de FC, EE, presente en los cladodios del NV y NF, y 2) sin cambios en los compuestos bioactivos (FEN, FLAV y AA) (Gráfica 1, 2 y 3). Las interpretaciones

planteadas por distintos investigadores, que podrían justificar este fenómeno, son las siguientes: la FC se pierde debido a la modificación de la estructura de la pared celular, debido al daño a los polisacáridos, durante la extrusión, lo que ocasiona la degradación de esta (Huang y Ma, 2015). En el caso del EE, Choton *et al.* (2020), establecen que los cambios en las propiedades bromatológicas de los lípidos durante la extrusión son complejos y varían con el equilibrio hidrofílico-lipofílico de los lípidos, la cantidad, el tipo y los materiales que se extruyen.

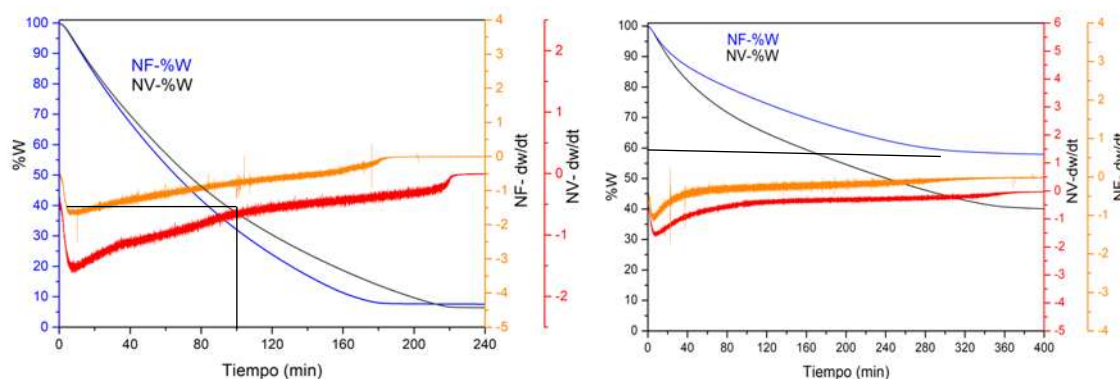
Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas



Esquema 1. Modelación esquemática del cambio de correlaciones de Pearson entre los indicadores bromatológicos y fitoquímicos del nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*) sometido al proceso de extrusión y deshidratación.

8.4 Análisis termicogravimétrico (TGA)

De acuerdo con los resultados en el TGA, se observó (Gráfica 4) que las curvas calorimétricas (negra y azul) del nopal en BF y extrusado, presentan comportamientos similares en la pérdida de peso, obteniendo 90% de pérdida para ambas muestras, sin embargo, se puede apreciar que el nopal forrajero requiere menor cantidad de tiempo para alcanzar una pérdida máxima con respecto al nopal verdura, el cual requiere 220 minutos. Lo anterior se puede asociar que la pérdida de humedad en algunas variedades de nopal es diferente, puesto que, la morfología y el contenido de humedad son diferentes (Dubeux *et al.*, 2021), lo cual, propició que la deshidratación del nopal forrajero fuese más lenta. Posterior al proceso de extrusión (Gráfica 4), se observó el mismo comportamiento descrito para el nopal en BF, sin embargo, cabe destacar que la pérdida de peso fue menor para el nopal forrajero, aspecto asociado a que esta variedad de nopal podría mantener en mayor proporción sus componentes nutricionales, entre ellos la fibra, lo cual se pudo observar en la Tabla 9.



Gráfica 4. Análisis termogravimétrico (TGA) del nopal verdura y forrajero (*O. ficus indica*) en BF (izquierda) y extrusado (derecha).

8.5 Conclusión

El proceso de extrusión modifica la composición bromatológica del nopal verdura y forrajero (*O. ficus-indica*). Dicha modificación se presenta de dos formas: la primera, incremento en la proteína cruda, extracto libre de nitrógeno y cenizas y, la segunda: la disminución la fibra cruda y el extracto etéreo. Dichas modificaciones en la composición bromatológica sugieren que, el nopal sometido al proceso de extrusión podría mejorar sus propiedades nutricionales

y mantiene las propiedad biofuncionales en comparación al nopal en BF. No obstante, se requiere de mayores investigaciones para establecer dicha sugerencia.

8.6 Referencias

1. Agarwal, S., y Chauhan, E. S. (2019). Extrusion processing: The effect on nutrients and based products. *The Pharma Innovation Journal*, 8(4), 464-470.
2. Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H., y Gupta, K. (2016). Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445-473.
3. Alam-Eldein, S. M., Ennab, H. A., Omar, A. E. D. K., y Omar, A. A. (2021). Harvest and postharvest technology of *Opuntia* spp. In *Opuntia spp. Chemistry, bioactivity and industrial applications*, 219–255.
4. Almaguer-Sierra, P., Rodríguez-Fuentes, H., Barrientos-Lozano, L., Mora-Ravelo, S. G., y Vidales-Contreras, J. A. (2014). Relación entre grados-días y la producción de *Opuntia ficus-indica* para el consumo humano en Marín, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(6), 1055-1065. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i6.889>
5. AOAC. (2002). *Official methods of analysis* (17.^a ed.). Arlington, VA, USA: Association of Official Analytical Chemists.
6. Aparicio-Ortuño, R., Lozada-Ramírez, J. D., de Parrodi, C. A., Silva-Pereira, T. S., Villaseñor-López, K., Ramírez-Rodrigues, M. M., y Ortega-Regules, A. E. (2024). Characterization of Mexican *Opuntia ficus indica* cladode and bioactive compound profile: Oxidative stress resistance and anti-adipogenic effect in *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-12.
7. Argente-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., Herrera-Sepúlveda, A., González-Aguilera, J., Sudheer, S., Salim, L. M., Lal, S., Pradeep, C. K., Ortiz, A., Sansinenea, E., Hathurusinghe, S. H. K., Shin, J. H., Babalola, O. O., y Azizoglu, U. (2024). Biotechnological advances in plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agriculture. *World Journal of Microbiology y Biotechnology*, 41(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-04231-4>

8. Astello-García, M. G., Cervantes, I., Nair, V., del Socorro Santos-Díaz, M., Reyes-Agueero, A., Gueraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L., y Barba de la Rosa, A. P. (2015). Chemical, metabolomic and proteomic analysis of young cladodes from *Opuntia* cultivars with different domestication grade. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>
9. Bautista-Justo, M., Pineda-Torres, R. I., Camarena-Aguilar, E., Alanís-Guzmán, G., Mota, D. V. M., y Barboza-Corona, J. E. (2010). El nopal fresco como fuente de fibra y calcio en panqués. *Acta Universitaria*, 20, 11-17. <https://doi.org/10.15174/au.2010.62>
10. Benayad, Z., Martinez-Villaluenga, C., Frias, J., Gomez-Cordoves, C., y Es-Safi, N. E. (2014). Phenolic composition, antioxidant and anti-inflammatory activities of extracts from Moroccan *Opuntia ficus-indica* flowers obtained by different extraction methods. *Industrial Crops and Products*, 62, 412-420. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.046>
11. Beyá-Marshall, V., Apablaza, E., Dias, A., y Sáenz, C. (2022, September). Physical and chemical characteristics of cladodes powder (*Opuntia ficus-indica* Mill.) of different maturation stages and drying temperatures. In *X International Congress on Cactus Pear and Cochineal: Cactus-the New Green Revolution in Drylands*, 1343, 519-524.
12. Bisharat, G. I., Oikonomopoulou, V. P., Panagiotou, N. M., Krokida, M. K., y Maroulis, Z. B. (2013). Effect of extrusion conditions on the structural properties of corn extrudates enriched with dehydrated vegetables. *Food Research International*, 53(1), 1-14.
13. Boukhalfa, S., y Hamdi, S. (2016). Évaluation phytochimique et étude des activités biologiques des extraits bruts des plantes médicinales locales: *Opuntia ficus indica* et *Thymus lanceolatus*. *Mémoire de Máster*, Université des Frères Mentouri Constantine.
14. Carrillo-Verástegui, K. A., Escamilla-Alvarado, C., Paniagua-Vega, D., Escárcega-González, C. E., Poggi-Varaldo, H. M., Sotelo-Navarro, P. X., Hernández-Flores, G.,

- y Zúñiga-Silva, J. R. (2024). Antioxidants and biomethane production from Opuntia varieties. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40, 65–81. <https://doi.org/10.20937/RICA.55062>
15. Choton, S., Gupta, N., Bandral, J. D., Anjum, N., y Choudary, A. (2020). Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 9(2), 162-168.
16. Contreras-Padilla, M., Gutiérrez-Cortez, E., Valderrama-Bravo, M. D. C., Rojas-Molina, I., Espinosa-Arbeláez, D. G., Suárez-Vargas, R., y Rodríguez-García, M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67, 44-49.
17. Cruz-de la Cruz, L. L., Espinosa-Solares, T., Aguilar-Méndez, M. Á., Guerra-Ramírez, D., & Hernández-Eugenio, G. (2020). Influence of microwave drying process on microstructure and thermodynamic properties of nopal cladodes. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 12(2), 115-130.
18. Cruz-Hernández, A., y Paredes-López, O. (2010). Aumento del valor económico del nopal y sus frutos mediante biotecnología. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 12, 110-126.
19. De Santiago, E., Domínguez-Fernández, M., Cid, C., y De Peña, M. P. (2018). Impact of cooking process on nutritional composition and antioxidants of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 240, 1055-1062
20. Dubeux Jr, J. C. B., dos Santos, M. V. F., da Cunha, M. V., dos Santos, D. C., de Almeida Souza, R. T., de Mello, A. C. L., y de Souza, T. C. (2021). Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 275, 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
21. Guevara-Figueroa, T., Jiménez-Islas, H., Reyes-Escogido, M. L., Mortensen, A. G., Laursen, B. B., Li-Wei, W., León-Rodríguez, A., Fomsgaard, I. N., y De la Rosa, A. P. (2010). Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23, 525-532. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.12.003>

22. Gusha, J., Halimani, T. E., Ngongoni, N. T., y Ncube, S. (2015). Effect of feeding cactus-legume silages on nitrogen retention, digestibility, and microbial protein synthesis in goats. *Animal Feed Science and Technology*, 206, 1-7.
23. Hernández-Castillo, J. B. E., Bernardino-Nicanor, A., Juárez-Goiz, J. M. S., y González-Cruz, L. (2016). Determinación de los cambios originados por los procesos de asado y freído del nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) sobre la concentración de carotenoides, fenoles totales y la actividad antioxidante. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1), 526-531.
24. Hernández-Urbiola, M. I., Pérez-Torrero, E., y Rodríguez-García, M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus-indica*) at varied ages in an organic harvest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1287-1295. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051287>
25. Huang, Y. L., y Ma, Y. S. (2016). The effect of extrusion processing on the physiochemical properties of extruded orange pomace. *Food chemistry*, 192, 363-369.
26. Kasote, D., Tiozon, R. N. Jr, Sartagoda, K. J. D., Itagi, H., Roy, P., Kohli, A., Regina, A., y Sreenivasulu, N. (2021). Food processing technologies to develop functional foods with enriched bioactive phenolic compounds in cereals. *Frontiers in Plant Science*, 12, 771276. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.771276>
27. Khaled, S., Mahdeb, A., Mazari, A., Dahmoune, F., Amrane-Abider, M., Hamimeche, M., y Madani, K. (2024). Optimized microwave-assisted extraction of total phenolic and flavonoid contents from defatted seeds and press residue of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology*, 48(1), 24-43.
28. Khalil, H. P. S. A., Hossain, M. S., Rosamah, E., Azli, N. A., Saddon, N., Davoudpoura, Y., Islam, M. N., y Dungani, R. (2015). The role of soil properties and its interaction towards quality plant fiber: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1006–1015.

29. Kucki, M., Kaiser, J. P., Clift, M. J., Rothen-Rutishauser, B., Petri-Fink, A., y Wick, P. (2014). The role of the protein corona in fiber structure–activity relationships. *Fibers*, 2(3), 187–210. <https://doi.org/10.3390/fib2030187>
30. López-Palacios, C., Peña-Valdivia, C. B., Rodríguez-Hernández, A. I., y Reyes-Agüero, J. A. (2016). Rheological Flow Behavior of Structural Polysaccharides from Edible Tender Cladodes of Wild, Semidomesticated and Cultivated ‘Nopal’ (Opuntia) of Mexican Highlands. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71, 388-395.
31. Maina, N. H., Rieder, A., De Bondt, Y., Mäkelä-Salmi, N., Sahlström, S., Mattila, O., Lamothe, L. M., Nyström, L., Courtin, C. M., Katina, K., y Poutanen, K. (2021). Process-induced changes in the quantity and characteristics of grain dietary fiber. *Foods*, 10(11), 2566. <https://doi.org/10.3390/foods10112566>
32. Makhalemele, B. L., De Wit, M., Truter, M. M., Du Toit, A., Fouche, H. J., Hugo, A., y Venter, S. L. (2022, September). Morphological and physico-chemical properties of nopalitos from twenty cactus pear cultivars. In *X International Congress on Cactus Pear and Cochineal: Cactus-the New Green Revolution in Drylands 1343*, 387-394.
33. Manzanarez-Tenorio, L. E., Ruiz-Cruz, S., Cira-Chávez, L. A., Estrada-Alvarado, M. I., Márquez-Ríos, E., Toro-Sánchez, C. L., y Suárez-Jiménez, G. M. (2022). Caracterización fisicoquímica, actividad antioxidante y contenido de fenoles y flavonoides totales de nopal morado (*Opuntia gosseliniana*) en dos etapas de coloración. *Biotecnia*, 168, 101-106. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1662>
34. Manzocco, L., Calligaris, S., Masrocola, D., Nicoli, M., y Lerici, C. R. (2001). Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. *Trends in Food Science y Technology*, 11, 340–346.
35. Missaoui, M., D'Antuono, I., D'Imperio, M., Linsalata, V., Boukhchina, S., Logrieco, A. F., y Cardinali, A. (2020). Characterization of micronutrients, bioaccessibility and antioxidant activity of prickly pear cladodes as functional ingredient. *Molecules*, 25(9), 2176. <https://doi.org/10.3390/molecules25092176>
36. Nobel, P. S. (1994). *Remarkable agaves and cacti*. Oxford University Press.

37. Orozco-Angelino, X., Espinosa-Ramírez, J., y Serna-Saldívar, S. O. (2023). Extrusion as a tool to enhance the nutritional and bioactive potential of cereal and legume by-products. *Food Research International*, 169, 112889.
38. Pérez-Sánchez, R. E., Delgado-Sánchez, L. A., García-Saucedo, P. A., Pulido, J., y Ortiz-Rodríguez, R. (2015). Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias. *Nova Scientia*, 8(16), 133-152.
39. Pérez-Servín, I. (2021). Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado (Tesis de Maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
40. Pérez-Viveros, D. J., Díaz-Batalla, L., Navarro-Cortez, R. O., Palma-Rodríguez, H. M., y Hernández-Urbe, J. P. (2024). Effect of extrusion on physicochemical and functional properties of cladode flour from *Opuntia cochenillifera* and *Opuntia ficus-indica*. *Applied Food Research*, 4(2), 1005.
41. Ponce-Luna, A., Pérez-Flores, J. G., Pérez-Escalante, E., Portillo-Torres, L. A., García-Curiel, L., y Contreras-López, E. (2024). Potencial del nopal para su incursión en la industria de la confitería. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*.
42. Qiu, C., Hu, H., Chen, B., Lin, Q., Ji, H., y Jin, Z. (2024). Research Progress on the Physicochemical Properties of Starch-Based Foods by Extrusion Processing. *Foods*, 13(22), 3677.
43. Rufian-Henares, J. A., y Delgado-Andrade, C. (2009). Effect of digestive process on Maillard reaction indexes and antioxidant properties of breakfast cereals. *Food Research International*, 42, 394–400.
44. Ruiz-Gutiérrez, M. G., y Quintero-Ramos, A. (2021). Prickly Pear (*Opuntia ficus indica*) Processing by Extrusion-Cooking. *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications*, 657-677
45. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). Plantación de nopal forrajero, una opción más para luchar contra la sequía.

<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/plantacion-de-nopal-forrajero-una-opcion-mas-para-luchar-contra-la-sequia>

46. Shah, A., y Smith, D. L. (2020). Flavonoids in agriculture: Chemistry and roles in biotic and abiotic stress responses, and microbial associations. *Agronomy*, 10(8), 1209.
47. Sharma, P., y Gujral, H. S. (2011). Effect of sand roasting and microwave cooking on antioxidant activity of barley. *Food Research International*, 44, 235–240.
48. Shi, W., Chai, L. J., Zhao, H., Song, Y. N., Mei, J. L., He, Y. X., y Xu, Z. H. (2024). Deciphering the effects of different types of high-temperature Daqu on the fermentation process and flavor profiles of sauce-flavor Baijiu. *Food Bioscience*, 61, 104917.
49. Singh, S., Gamlath, S., y Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science y Technology*, 42(8), 916-929.
50. Slimane, M., Boumediene, B., Cruz, C., Karima, B., Bousedra, F., Bensekrane, Z., y Nabti, EH (2024). Phytochemical Characterization and Evaluation of the Biological Activities of *Opuntia ficus indica* L. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.0362.v1>
51. Torres Ponce, R. L., Morales Corral, D., Ballinas Casarrubias, M. D. L., y 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), 1129-1142. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263139893015>
52. Torres, S., Verón, H., Contreras, L., y Isla, M. I. (2020). An overview of plant-autochthonous microorganisms and fermented vegetable foods. *Food Science and Human Wellness*, 9(2), 112-123.
53. Vallons, K. J., y Arendt, E. K. (2010). Understanding high pressure-induced changes in wheat flour–water suspensions using starch–gluten mixtures as model systems. *Food Research International*, 43(3), 893-901.
54. Varel-Pérez, P., Winkler, B., Röcker, P., y von Cossel, M. (2024). Combined Bioenergy and Food Potential of *Opuntia ficus-indica* Grown on Marginal Land in Rural Mexico. *Energies*, 17(24), 6278.

55. Wang, K. Q., Luo, S. Z., Zhong, X. Y., Cai, J., Jiang, S. T., y Zheng, Z. (2017). Changes in chemical interactions and protein conformation during heat-induced wheat gluten gel formation. *Food Chemistry*, 214, 393-399.
56. Wei, X., Xie, B., Wan, C., Song, R., Zhong, W., Xin, S., y Song, K. (2024). Enhancing soil health and plant growth through microbial fertilizers: Mechanisms, benefits, and sustainable agricultural practices. *Agronomy*, 14(3), 609.
57. Williams, B. A., Mikkelsen, D., Flanagan, B. M., y Gidley, M. J. (2019). “Dietary fibre”: Moving beyond the “soluble/insoluble” classification for monogastric nutrition, with an emphasis on humans and pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0308-5>
58. Xu, B., y Chang, S. K. C. (2008). Total phenolics, phenolic acids, isoflavones, and anthocyanins and antioxidant properties of yellow and black soybeans as affected by thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 7165–7175.

9. Capítulo 3. Evaluación de la calidad del extrusado de nopal verdura y forrajero (*O. ficus indica*) sometido a un proceso de vida de anaquel acelerada

Resumen

El objetivo fue evaluar la calidad del extrusado de nopal verdura y forrajero sometido a un proceso de vida de anaquel acelerada. La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH, ubicada en la ciudad de Morelia Michoacán. Se utilizaron 160 g de extruido de nopal (*O. ficus-indica*) con un edad de 85 días de vida de anaquel, con los cuales se conformaron dos tratamientos (T): T1 (n=80g) extrusado de nopal verdura (EXT-NV) y T2 (n=80g) extrusado de nopal forrajero con (EXT-NF), y fueron divididos en cuatro porciones de 20 gramos por tratamiento. Las muestras/tratamiento se colocaron dentro de una cámara climática Ecoshel®, a temperatura de 45 ± 1 °C y 50 ± 5 % de humedad relativa. Se evaluó la textura, color, humedad y actividad de agua (Aw). Referente a la Aw, el Ext-NV mostró mayores valores a lo largo de la investigación (0.440, a 0.403, respectivamente). Referente a humedad, en los días 125 y 165 de medición el EXT-NF (7.3 y 5.7%, respectivamente) mostró mayores ($p<0.05$) valores con respecto al EXT-NV (6.0 y 4.7%, respectivamente). La dureza, inicialmente fue mayor ($p<0.05$) en el EXT-NV (50.2N), no obstante, en los días 85 y 125 (36.3 y 32.4N, respectivamente) el EXT-NF presentó mayor ($p<0.05$) dureza con respecto al EXT-NV (22.7 y 22.0 N, respectivamente). En cuanto al color, en el día 85, 125 y 165, el EXT-NV se observó mayor($p<0.05$) luminosidad (41.6, 37.4 y 36.7), con respecto al EXT-NF (38.7, 35.5 y 33.1). Referente al croma el EXT-NF mostró valores más elevados ($p<0.05$) desde el inicio hasta el día 165 de medición (17.2 a 13.0, respectivamente). Así mismo, el EXT-NF (88.3 a 83.5) presentó mayores($p<0.05$) valores del °hue vs EXT-NV (886.1 a 81.9), durante los días de medición. El proceso de extrusión mantuvo las propiedades físicas y químicas del NV y NF, durante su almacenamiento, no obstante, a partir del día 165 estos pierden propiedades texturales. Estos hallazgos sugieren dicho proceso puede mejorar la estabilidad del producto durante el almacenamiento, pero se requieren de la implementación de estrategias tecnológicas adicionales.

Palabras clave: tiempo de conservación, temperatura, dureza, humedad.

9.1 Introducción

En los últimos años, los frutos y vegetales frescos han emergido como uno de los segmentos de mayor expansión en la industria alimentaria, lo que ha impulsado un notable crecimiento en las investigaciones enfocadas en este sector alimenticio (Salinas–Hernández *et al.*, 2010), en donde dicho incremento se debe a la constante demanda de alimentos prácticos, saludables y con propiedades funcionales, que se adecuen a las necesidades de los consumidores actuales (Galanakis, 2021). En este sentido, la elaboración de nuevos procesos tecnológicos desempeñan un papel importante en la mejora de la calidad, seguridad y durabilidad de los productos terminados (Jurić *et al.*, 2023), principalmente en aquellos con alto contenido de agua y nutrientes, como es el caso del nopal (*O. ficus-indica*).

En el nopal (*O. ficus-indica*), una de las alternativas para el aprovechamiento de las variedades como verdura y forraje, es el proceso de extrusión, el cual permite el desarrollo de productos con aplicaciones en la alimentación humana y animal (Moscicki *et al.*, 2011; Offiah *et al.*, 2019). Además de que el proceso de extrusión puede mejorar las características nutrimentales, también mejorar la estabilidad del producto final al reducir la humedad y actividad de agua, lo que reduce el riesgo de deterioro microbiológico y en consecuencia aumenta su vida útil (Yi *et al.*, 2022; Lazou, 2024).

Actualmente, la calidad de los productos terminados mediante el proceso de extrusión es un factor clave en los mercados competitivos, no obstante, es esencial evaluar el producto final bajo condiciones controladas, en este sentido, la simulación de vida de anaquel acelerada es una herramienta útil para identificar cambios en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los alimentos procesados, lo que genera información clave para modificar los procesos utilizados (Phan *et al.*, 2014). Por ello, la presente investigación tiene como objetivo particular evaluar la calidad del extrusado elaborado a partir de nopal verdura y forrajero, considerando su composición nutrimental y los cambios ocurridos durante un proceso de vida de anaquel acelerada.

9.2 Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH, ubicada en la ciudad de Morelia Michoacán. Se utilizaron 160 g de extruido de nopal (*O. ficus-indica*) con un edad de 85 días de vida de anaquel, con los cuales se conformaron dos tratamientos (T): T1 (n=80g) extrusado de nopal verdura (EXT-NV) y T2 (n=80g) extrusado de nopal forrajero con (EXT-NF), los cuales fueron divididos en cuatro porciones de 20 gramos por tratamiento empaquetadas en bolsas ziploc. Las cuatro muestras por tratamiento se colocaron dentro de una cámara climática Ecoshel®, a temperatura de 45 ± 1 °C y 50 ± 5 %.

Considerando que la temperatura ambiente estándar es de 25°C, una temperatura de 45°C tiene un Q10 de 2 unidades de manera teórica.

- A 25°C el valor de $Q_{10} = 0$ Temperatura ambiente estándar
- A 35°C el valor de $Q_{10} = 1$
- A 45°C el valor de $Q_{10} = 2$ 1 día = 4 días $(2)^2$

Se evaluaron 20 días a 45 °C, equivalentes a 120 días a 21°C (4 meses). En cada muestreo se evaluó por triplicado la textura, color, humedad y actividad de agua (AW), los días 85, 125 y 165 de vida de anaquel.

Para el caso de la textura, esta se evaluó mediante la prueba de dureza, utilizando un texturometro (Brookfiel) con la sonda TA8. Este accesorio consistió en una base, en donde se colocó la muestras por tratamiento y se sometieron a compresión hasta lograr el rompimiento. De la curva resultante se obtuvo la fuerza máxima requerida en Newtons (N). Las condiciones de prueba fueron: velocidad 1 mm/s y una distancia de 4 mm. Referente al color, se utilizó un colorímetro manual (BYK Gardner USA), en donde se colocaron 2.5 gramos de extrusado por tratamiento en una base transparente en total oscuridad, sobre una superficie de color blanco, y se determinaron los parámetros de luminosidad, croma o saturación y el ángulo °hue. Referente a la determinación de humedad, esta se realizó mediante una termobalanza (OHAUS® MB33) en la que se colocaron 2.0 g de muestra/tratamiento. Finalmente, para la determinación de la AW se utilizó un medidor de

actividad de agua portátil (LabSwift-aw NOVASINA®), en donde se colocaron en un recipiente 2g de la muestra/tratamiento.

Análisis de datos

$$Y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Variable respuesta: textura, color, humedad y actividad de agua (AW).

μ = Promedio general

T_i = Efecto fijo del Tratamiento con i ésimo Tratamiento= T1 y T2

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

9.3 Resultados y discusión

De acuerdo con los resultados (Tabla 10), se encontró efecto ($p<0.05$) de tratamiento sobre la actividad de agua, humedad y dureza del extrusado del nopal. Referente a la actividad de agua (Tabla 10), todos los promedios del NV y NF en los tiempos de evaluación fueron diferentes ($p>0.05$) el Ext-NV mostró mayores ($p<0.05$) valores a lo largo de la evaluación (de 0.430, a 0.403). Referente a humedad (Tabla 10), en el día 85 de medición no se encontró ($p>0.05$) diferencias entre los tratamientos evaluados, pero si en los días 125 y 165, en los cuales el EXT-NF (7.3 y 5.7%, respectivamente) mostró mayores ($p<0.05$) valores con respecto al EXT-NV (6.0 y 4.7%, respectivamente).

La actividad de agua (AW) es una medida de la disponibilidad de agua libre en un alimento, crucial para su estabilidad y calidad (Sandulachi, 2012). No obstante, la disminución en la actividad de agua y la humedad durante el almacenamiento es un comportamiento típico de productos extrusados debido a la pérdida de agua libre por difusión y su almacenamiento (Ramya y Jain, 2017). Además, en temperaturas elevadas, como 45 °C, los alimentos pierden humedad debido a la evaporación, lo que reduce tanto su contenido de humedad como su actividad de agua y en consecuencia se reduce las reacciones químicas dentro del alimento (Bradford *et al.*, 2020), proporcionando una estabilidad mayor, hecho que se presentó en esta investigación. Berman (2007) y Reyes y Martínez. (2009) establecen que la humedad de los

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

productos extrusados para la alimentación animal, no deben de exceder el 12%, lo cual concuerda con los valores obtenidos a lo largo de esta investigación, los cuales se encontraron entre 8 a 5.7%.

Tabla 10. Medias de mínimos cuadrados de AW, Humedad y Dureza, de acuerdo con los días de medición.

Días de medición							
	85		125		165		E. E
	EXT-NV	EXT-NF	EXT-NV	EXT-NF	EXT-NV	EXT-NF	
AW	0.430 ^a	0.365 ^b	0.428 ^a	0.351 ^b	0.403 ^a	0.324 ^b	0.004
Humedad	7.3 ^a	7.7 ^a	6.0 ^a	7.3 ^b	4.7 ^a	5.7 ^b	0.33
Dureza	22.7 ^a	36.3 ^b	22.0 ^a	32.4 ^b	17.3 ^a	16.7 ^a	1.16

Literales a, b indican diferencias entre tratamientos dentro de tiempo.

Con respecto a la dureza, inicialmente fue mayor ($p < 0.05$) en el EXT-NV (44.3N), no obstante, en los días 85 y 125 se observó una disminución (36.3 y 32.4N, respectivamente). Sin embargo, al final de la evaluación el promedio de dureza fue igual para ambos nopales. De acuerdo con los resultados, Thomas y Van Der Poel. (1996), Rakic, (2013), Ulens *et al.* (2015), describen que la dureza de los extrusados en la alimentación animal pueden variar, dependiendo la especie y la etapa productiva, no obstante, se ha registrado que, para que se considere un productos de calidad este debe de ser mayor a los 32 N (Rojas y Stein, 2017; Nichols *et al.*, 2019), valores a partir del día 165 se muestran por debajo en esta investigación a los reportado por dichos autores.

Benítez *et al.* (2013) establecen que, la pérdida de humedad a altas temperaturas en el extruido de nopal pudo generar un impacto reductivo en su estructura física y propiedades texturales, es decir que, a medida que el agua se evapora, las estructuras celulares del material, dependiente en gran parte del agua para mantener su rigidez y cohesión, comienzan a ablandarse, lo que redujo la firmeza del producto; en cuanto a este efecto Barbhuiya *et al.* (2021), determinaron que es más marcado en la presencia de calor, puesto que este acelera la desnaturalización de proteínas, lo que provoca un rompimiento de sus enlaces secundarios y terciarios, generando un debilitamiento de la red proteica que contribuye a la estructura del alimento (Yousefi y Abbasi, 2022). Asimismo, el calor del almacenamiento pudo afectar los polisacáridos estructurales del extrusado, como la celulosa y la hemicelulosa, lo que pudo

originar cambios en su organización molecular y reduciendo su capacidad para retener agua (Joardder *et al.*, 2017).

En cuanto a los resultados del color de los tratamientos evaluados (Tabla 11), se encontró que la luminosidad (L^*), en el EXT-NV (41.6) y EXT-NF (38.7), mostraron valores iniciales diferentes ($p>0.05$). Durante tiempo de almacenamiento, ambos tratamientos presentaron una disminución en los valores de luminosidad. En el día 85, 125 y 165 (Tabla 11), el EXT-NV presentó mayor ($p<0.05$) luminosidad (36.7), con respecto al EXT-NF (33.1). Referente a la saturación o croma (C) el tratamiento EXT-NF mostró valores más elevados ($p<0.05$) desde el inicio hasta el día 165 de medición (12.9 a 13.0, respectivamente). Así mismo, el EXT-NF (86.9 a 83.5) presentó mayores ($p<0.05$) valores del °hue (H) vs EXT-NV (84.8 a 81.9), durante los días de medición.

Tabla 11. Medias de mínimos cuadrados para el color de los tratamiento y día de medición

	Días de medición								E. E
	0		85		125		165		
	EXT-NV	EXT-NF	EXT-NV	EXT-NF	EXT-NV	EXT-NF	EXT-NV	EXT-NF	
L	43.2 ^a	44.2 ^a	41.6 ^a	38.7 ^b	37.4 ^a	35.5 ^b	36.7 ^a	33.1 ^b	0.5
C	13.4 ^a	17.2 ^b	12.9 ^a	16.7 ^b	10.6 ^a	15.4 ^b	10.6 ^a	13.0 ^b	0.43
H	86.1 ^a	88.3 ^b	84.8 ^a	86.9 ^b	84.7 ^a	86.6 ^b	81.9 ^a	83.5 ^b	0.54

L=Luminosidad; C= saturacion o croma; H=°hue.

En cuanto al oscurecimiento encontrado en los tratamientos, pudo estar causado tanto por reacciones enzimáticas como no enzimáticas, las cuales afectan la apariencia del producto durante su procesamiento y almacenamiento (Jiang *et al.*, 2016; Croguennec, 2016). La enzima polifenoloxidas presente en el nopal (Apodaca-Pérez *et al.*, 2016), participa en este fenómeno; en presencia de oxígeno, esta enzima cataliza la oxidación de los compuestos fenólicos presentes en las células vegetales, lo que resulta en la formación de melaninas, pigmentos oscuros responsables del oscurecimiento del producto (Selvarajan *et al.*, 2018; Gandhi *et al.*, 2018). No obstante, este fenómeno no solo puede estar determinado por las reacciones enzimáticas, también el pardeamiento no enzimático por interacciones entre azúcares y aminoácidos (como la reacción de Maillard), pueden contribuir al oscurecimiento, aunque su velocidad y efecto dependerá de las condiciones específicas de temperatura y humedad (Fan *et al.*, 2023).

9.4 Conclusión

El proceso de extrusión mantuvo las propiedades físicas y químicas del nopal verdura y forrajero, durante su almacenamiento, no obstante, a partir del día 165 estos pierde propiedades texturales. Estos hallazgos sugieren que dicho proceso puede mejorar la estabilidad del producto durante el almacenamiento, pero se requiere de la implementación de estrategias tecnológicas adicionales para optimizar su formulación y extender su vida útil sin comprometer sus propiedades sensoriales y funcionales.

9.5 Referencias

1. Alam-Eldein, S. M., Ennab, H. A., Omar, A. E. D. K., y Omar, A. A. (2021). Harvest and postharvest technology of *Opuntia* spp. In *Opuntia spp. Chemistry, bioactivity and industrial applications*, 219–255.
2. Apodaca-Pérez, J. M., Martínez-Miranda, M. de la L., Robles-Burgueño, M. del R., y Rodríguez Félix, A. (2016). Polifenoloxidasas, fenoles totales y oscurecimiento de nopal verdura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 531-543.
3. Barbhuiya, R. I., Singha, P., y Singh, S. K. (2021). A comprehensive review on impact of non-thermal processing on the structural changes of food components. *Food Research International*, 149, 110647.
4. Benítez, A. J., Torres-Rendón, J., Poutanen, M., y Walther, A. (2013). Humidity and multiscale structure govern mechanical properties and deformation modes in films of native cellulose nanofibrils. *Biomacromolecules*, 14(12), 4497-4506.
5. Bradford, K. J., Dahal, P., Van Asbrouck, J., Kunusoth, K., Bello, P., Thompson, J., y Wu, F. (2020). The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. En *Food industry wastes*, 375-389.
6. Croguennec, T. (2016). Non-enzymatic browning. In *Handbook of Food Science and Technology 1: Food Alteration and Food Quality*; Jeantet, R., Croguennec, T., Schuck, P., Brulé, G., Eds.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 1–248. ISBN 9781119268659
7. Dubeux Jr, J. C. B., dos Santos, M. V. F., da Cunha, M. V., dos Santos, D. C., de Almeida Souza, R. T., de Mello, A. C. L., y de Souza, T. C. (2021). Cactus (*Opuntia*

- and *Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 275, 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
8. Fan, Y., Yu, M., Li, D., Zhao, G., Zhang, M., Wang, Z., Liu, Y., y Zhou, D. (2023). Effects of non-enzymatic browning and lipid oxidation on color of ready-to-eat abalone during accelerated storage and its control. *Foods*, 12(7), 1514. <https://doi.org/10.3390/foods12071514>
 9. Galanakis, C. M. (2021). Functionality of food components and emerging technologies. *Foods*, 10(1), 128.
 10. Gandhi, K. D., Faldu, P. R., Patel, K. G., Solanki, V. H., Kansara, R. V., Singh, S., y Vyas, T. K. (2018). Plant polyphenol oxidase: Biochemical properties and browning of fruits and vegetables. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 31(1), 1-8.
 11. Jiang, Y., Duan, X., Qu, H., y Zheng, S. (2016). Browning: Enzymatic Browning. *Encyclopedia of Food and Health*, 508-514. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384947-2.00090-8>
 12. Joardder, M. U., Kumar, C., y Karim, M. A. (2017). Food structure: Its formation and relationships with other properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1190-1205.
 13. Jurić, M., Bandić, L. M., Carullo, D., y Jurić, S. (2024). Technological advancements in edible coatings: Emerging trends and applications in sustainable food preservation. *Food Bioscience*, 103835.
 14. Kucki, M., Kaiser, J. P., Clift, M. J., Rothen-Rutishauser, B., Petri-Fink, A., y Wick, P. (2014). The role of the protein corona in fiber structure–activity relationships. *Fibers*, 2(3), 187–210. <https://doi.org/10.3390/fib2030187>
 15. Lazou, A. E. (2024). Food extrusion: An advanced process for innovation and novel product development. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(14), 4532-4560.
 16. Moscicki, L. (2011). *Extrusion-cooking techniques: applications, theory and sustainability*. John Wiley y Sons.

17. Offiah, V., Kontogiorgos, V., y Falade, K. O. (2019). Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(18), 2979-2998.
18. Phan, U. T. X., Chambers IV, E., Padmanabhan, N., y Alavi, S. (2014). Accelerated vs. real time modeling for shelf life: An example with fortified blended foods. *Science and Technology Development Journal*, 17(3), 83-91.
19. Salinas-Hernández, R. M., Pirovani, M. É., Gardea-Béjar, A. A., y González-Aguilar, G. A. (2010). Cambios fisicoquímicos y sensoriales limitantes de la vida de anaquel de mango fresco cortado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(3), 215-223.
20. Sandulachi, E. (2012). Water activity concept and its role in food preservation. *Meridian Ingineresc*, (4), 40-48.
21. Selvarajan, E., Veena, R., y Manoj Kumar, N. (2018). Polyphenol oxidase, beyond enzyme browning. *Microbial bioprospecting for sustainable development*, 203-222
22. Williams, B. A., Mikkelsen, D., Flanagan, B. M., y Gidley, M. J. (2019). “Dietary fibre”: Moving beyond the “soluble/insoluble” classification for monogastric nutrition, with an emphasis on humans and pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0308-5>
23. Yi, C., Qiang, N., Zhu, H., Xiao, Q., y Li, Z. (2022). Extrusion processing: A strategy for improving the functional components, physicochemical properties, and health benefits of whole grains. *Food Research International*, 160, 111681.
24. Yousefi, N., y Abbasi, S. (2022). Food proteins: Solubility & thermal stability improvement techniques. *Food Chemistry Advances*, 1, 100090.

10. Discusión general

A lo largo del tiempo, en el cultivo de nopal se ha recurrido a la utilización de fertilizantes orgánicos e inorgánicos con la finalidad de mejorar aspectos productivos y de calidad (Tavera-Cortés *et al.*, 2018; Mayer y Cushman, 2019), no obstante, no se ha establecido qué elementos bromatológicos, fitoquímicos o morfológicos de la planta se relacionan con una mayor producción y cuáles son los cambios químicos, lo que limita su explicación. Por ello, la determinación de los componentes químicos post-fertilización de los cladodios de nopal verdura y forrajero a través de su caracterización, son de importancia para poder contribuir y complementar la información relacionada con la mejora que se obtiene.

Para la caracterización del nopal verdura y forrajero, se debe de considerar elementos y sus interacciones, que inciden en sus cualidades químicas tales como: las interacciones con el entorno, las condiciones biológicas (variedad) y ambientales, así como las condiciones y propiedades edafológicas del suelo donde se cultiva (Sánchez-Pérez *et al.*, 2013; Neffar *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2024). Del mismo modo, los procesos realizados durante la etapa postcosecha, incluidas las estrategias de conservación y los tratamientos preliminares al análisis, pueden modificar las propiedades químicas del nopal (Goettsch *et al.*, 2019; Choque-Quispe *et al.*, 2022). En este sentido, es necesario un enfoque teórico completo que permita evaluar con precisión los impactos derivados de dichas prácticas sobre la composición química del nopal.

Diversas investigaciones establecen que la aplicación de fertilizantes químicos (nitrogenados) pueden mejorar en el rendimiento de los cultivos y la calidad del nopal (Arba *et al.*, 2013; Rodrigues y Queires, 2015; Silva *et al.*, 2016). No obstante, aunque el fertilizante químico incremento la biomasa producida del nopal verdura y forrajero (22.8 y 13.7 kg) y mejoró aspecto bromatológicos (PC y ELN), este no logró estar a la par de los fertilizantes orgánicos. Aspecto que concuerdan con Leite *et al.* (2018), puesto que no encontraron mejoras en la producción de nopal, pero el contenido de proteínas y carbohidratos aumentaron mediante la aplicación de fertilizantes químicos (nitrogenados). Así mismo Cunha *et al.* (2012), no encontraron mayor producción de biomasa mediante la aplicación de tres dosis de nitrógeno (100, 200 y 300 kg/ha). Chinchay (2015) y Yadav *et al.* (2017), mencionan que, la reducción en el efecto de los fertilizantes químicos sobre

las productividad el nopal, está influenciada por la pérdida por volatilización, desnitrificación, lixiviación y conversión en formas no disponibles, lo cual reducen su efectividad y eficiencia.

Las limitaciones asociadas al uso de fertilizantes químicos y el constante cambio climático asociados con las alteraciones en los ecosistemas causadas por las temporadas cortas de lluvias, inundaciones, sequías y ataques de plagas a los cultivos (Baarsch *et al.*, 2020; Chalise *et al.*, 2017; Falco *et al.*, 2019), fomentaron la implementación de estrategias para reducir los efectos negativos de estos y mejorar el rendimiento de los cultivos de nopal (do Nascimento *et al.*, 2022). Una de estas estrategias es el uso de fertilizantes de liberación prolongada, como es el caso de la composta, la cual ha sido utilizado los cuales permiten una dosificación gradual de nutrientes, minimizando las pérdidas por volatilización y lixiviación, y maximizando la disponibilidad de nitrógeno en el suelo durante periodos prolongados (Vejan *et al.*, 2021; Reimer *et al.*, 2023).

En esa investigación, la composta de bovino logró mejorar no solo la productividad del nopal verdura y forrajero (25.0 y 15.1 kg), sino que además las características morfológicas y fitoquímicas de ambas variedades se vieron beneficias mediante la aplicación de este fertilizante. En concordancia, Tavera-Cortés *et al.* (2018) establecieron que la composta de bovino (1568.1 kg) incremento mayormente la producción de biomasa vs los fertilizantes químicos (939.97 kg) y el tratamiento testigo (883.43 kg), así mismo, Donato *et al.* (2020) determinaron que la máxima producción de nopal fue de 21,8t por ha/año en base seca, obtenida mediante la utilización de 71.8 t/ha/año de estiércol de bovino. Al respecto, da Costa *et al.* (2024), concuerdan con el incremento en los flavonoides y fenoles totales presentados en esta investigación, dichos autores, establecen que la implementación de fertilizantes orgánicos (composta) en el nopal promueve la acumulación de compuestos bioactivos, como flavonoides, antocianinas y compuestos fenólicos, las cuales tienen propiedades antioxidantes.

Las mejoras en la productividad y sus componentes bromatológico se debe principalmente a que la aplicación de composta incrementa la materia orgánica del suelo, esto mejora su estructura, retención de humedad y la capacidad de intercambio catiónico, lo que facilita la

disponibilidad de nutrientes para las plantas (Barthod *et al.*, 2018). Además de mejorar la estructura del suelo, la composta enriquece el medio con nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, fundamentales para el desarrollo óptimo de futuros cultivos (Sánchez *et al.*, 2017). En cuanto al incremento en los componente fitoquímicos, este se debe principalmente a que la síntesis de estos compuestos está estrechamente relacionada con el aporte de nitrógeno y el metabolismo de la planta, como es el caso del aminoácido fenilalanina, el cual es precursor de los compuestos fenólicos (Ortega García *et al.*, 2015).

A pesar de que los fertilizantes orgánicos son sostenibles, necesitan de largos periodos de descomposición, lo que provoca una disponibilidad más lenta de nutrientes (Sharma *et al.*, 2019). En este contexto, los biofertilizantes, fabricados con microorganismos beneficiosos, se ven como una opción ecológica para potenciar la nutrición vegetal y la salud del suelo (Maćik *et al.*, 2020). Las bacterias que promueven el crecimiento vegetal han ganado importancia debido a su habilidad para capturar nitrógeno atmosférico, solubilizar fósforo y generar fitohormonas que impulsan el crecimiento de las plantas (Bhattacharyya y Jha, 2012). De igual manera, el uso de estas bacterias ha demostrado ventajas en varios cultivos, al incrementar la absorción de nutrientes y fomentar la promoción de la absorción de nutrientes.

Con respecto a los beneficios del bioinoculante aplicado en la presente investigación, este fue el segundo tratamiento con mejor rendimiento en la producción de biomasa, así como su aporte en el incremento de los compuestos químicos del nopal verdura y forrajero, lo cual, concuerdan con lo reportado por Gardezi *et al.* (2022), cuyos autores implementaron la inoculación de endomicorriza y vermicompost en el cultivo de nopal, obteniendo un mayor crecimiento del tallo y la raíz, así como mejorar la nutrición mineral de la planta y, en consecuencia, aumentaron los rendimientos en las plantaciones de nopal y reducir de los costos de producción. Así mismo, Lahbouki *et al.* (2022) establecieron que la aplicación de biofertilizantes (micorrizas) y vermicompost incrementaron el peso seco de los cladodios, la clorofila total y el contenido fenólico total.

En general, es un hecho que la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos ha demostrado mejorar la composición nutricional y la productividad del nopal (*O. ficus-indica*), así como incrementar el contenido de compuestos bioactivos y minerales, los cuales

son fundamentales para su aprovechamiento agroindustrial (Santiago-Lorenzo *et al.*, 2016; Bhattacharyya y Jha, 2012). No obstante, para alargar la vida útil y mejorar la estabilidad del nopal mejorado, se requiere de la aplicación de procesos tecnológicos de conservación. En este contexto, la extrusión se surge como un proceso eficiente para procesar y preservar los componente del nopal, lo que generaría un producto con mayor durabilidad, mejor digestibilidad y propiedades funcionales (Day y Swanson, 2013).

La extrusión es un proceso termo-mecánico que ha demostrado ser altamente efectivo para mejorar la conservación y calidad de los productos terminados (Alam *et al.*, 2016). Dado que el nopal es una planta con un alto contenido de humedad (Contreras *et al.*, 2012), su rápido deterioro representa un desafío para su almacenamiento y comercialización, por lo que su procesamiento mediante extrusión permite reducir la actividad enzimática y microbiana, prolongando así su vida útil (Nikmaram *et al.*, 2017), aspectos que se corroboraron en la presente investigación, en donde los parámetro como la actividad de agua y la humedad, se encontraron por debajo de los valores que propician el crecimiento bacteriano y actividad enzimática (>0.6 aw y $>12\%$, respectivamente) (Abbas *et al.*, 2009; Hamad, 2012), en este sentido el proceso de extrusión propicio estabilidad en el extrusado de nopal verdura y forrajero.

Durante la extrusión, al material sometido a temperaturas prolongas, presión y el corte por cizalla, provoca modificaciones en su estructura química y física, mejorando su digestibilidad y funcionalidad (Huang *et al.*, 2022). Uno de los efectos más marcados durante este proceso es la transformación de la fibra dietética, ya que la fracción insoluble, la cual está compuesta principalmente por celulosa y hemicelulosa, se degrada parcialmente, mientras que la fibra soluble aumenta (Vasanthan *et al.*, 2002; Robin *et al.*, 2012; Arribas *et al.*, 2017), efecto que se observó en esta investigación, específicamente en la reducción de fibra cruda postproceso de extrusión. No obstante, esta reducción puede favorecer la absorción de nutrientes, lo que mejora su utilización en la alimentación animal y humana. Además, la reducción de la fibra cruda y la reducción de humedad durante el proceso de extrusión, pueden generar un efecto de concentración de otro componentes (Singh *et al.*, 2007), lo que explicaría el incremento de la proteína cruda y cenizas en los extruidos de nopal verdura y forrajero. En este sentido,

dicho proceso propicio que el extruido de nopal en las dos variedades evaluadas tengan mejores valores nutricionales.

Otro aspecto por considerar del proceso de extrusión es su efecto en los compuestos bioactivos, Liu *et al.* (2019) y Yi *et al.* (2022), determinaron que, el proceso de extrusión puede beneficiar la liberación de polifenoles, flavonoides y otros antioxidantes, al desprender las estructuras celulares que los inhiben, lo que puede genera un incrementar su biodisponibilidad y actividad antioxidante. Así mismo, el calor y presión generado durante la extrusión puede inactivar enzimas responsables del pardeamiento y degradación de estos compuestos (Navale *et al.*, 2015), lo cual permite que el producto final conserve su capacidad antioxidante y funcionalidad. Aun y cuando, los valores de flavonoides y fenoles en esta investigación no incrementaron en el extrusado de nopal verdura y forrajero, la actividad antioxidante si mostró un incrementó, aspecto que concuerda con lo descrito por los autores antes mencionados.

La combinación de la fertilización adecuada con procesos de conservación como la extrusión permite maximizar el aprovechamiento del nopal, lo que permite que los beneficios obtenidos en campo a través del uso de biofertilizantes se reflejen en un producto final con alto valor agregado, esta integración no solo optimiza la calidad nutricional y funcional del nopal, sino que también contribuye a su estabilidad, facilitando su almacenamiento y comercialización en diferentes presentaciones. Por último, es importante mencionar que, en la presente caracterización del nopal verdura y forrajero se consideraron los componentes, compuestos bromatológicos, fitoquímicos y morfológicos de relevancia para la implementación de los productores y la alimentación animal. Sobre estos se fundamentan los beneficios atribuidos, siendo cada componente responsable de efectos específicos. Por ello, en la presente investigación no se consideraron todos los elementos que integran de manera general al nopal verdura y forrajero, no obstante, esta investigación servirá como base para posteriores investigaciones.

11. Conclusion general

Mediante la caracterización de los componente del nopal verdura y forrajero fertilizado y procesado, determinó que la aplicación de fertilizantes mejora la productividad y los parámetro químicos, así como el proceso de extrusión a mantener los componente químicos del nopal en base fresca. Lo anterior dio pauta para establecer que, la fertilización con composta y composta más bioinoculante y su procesamiento mediante la extrusión, son la estrategias adecuadas para mantener e incrementar los componente nutricionales del nopal en base fresca, así como de incrementar su vida de anaquel, lo que permite que los productores puedan almacenarlo e implementarlo en la alimentación animal. Sin embargo, se requieren de mayores investigaciones para establecer dicha afirmación.

12. Bibliografía

1. Abbas, K. A., Saleh, A. M., Mohamed, A., y Lasekan, O. (2009). The relationship between water activity and fish spoilage during cold storage: A review. *Journal of Food, Agriculture y Environment*, 7(3/4), 86-90.
2. Abdul, K. H. P. S., Hossain, M. S., Rosamah, E., Azli, N. A., Saddon, N., Davoudpour, Y., Izlam, N. M., y Dungani, R. (2015). The role of soil properties and its interaction towards quality plant fiber: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1006–1015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.099>
3. Abreu, A., Milke, M., Argüello, G., Calderón, A., Carmona, R., Consuelo, A., Coss, E., García, M., Hernández, V., Icaza, M., Martínez, J., Morán, S., Ochoa, E., Reyes, M., Rivera, R., Zamarripa, F., Zárate, F., y Vázquez, R. (2021). Fibra dietaria y microbiota, revisión narrativa de un grupo de expertos de la Asociación Mexicana de Gastroenterología. *Revista de Gastroenterología de México*, 86(3), 287–304.
4. Acevedo, J. M. N., Cruz, A. S., Hernández, A. M., y Barrera, A. C. (2017). *El nopal como regulador de glucosa en diabéticos*. Centro Educativo Cruz Azul Campus Hidalgo.

5. Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., y Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology*, 58, 921–929.
6. Aguilar, Y. M. I., Hernández, M. O., Guerrero, L. I., Ramírez, B. J. E., Aranda, O. G., y Crosby, G. M. M. (2011). Productive response of lambs fed with fresh or dehydrated spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* L.). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 13, 23-35.
7. Aina, O. E., Amoo, S. O., Mugivhisa, L. L., y Olowoyo, J. O. (2019). Effect of organic and inorganic sources of nutrients on the bioactive compounds and antioxidant activity of tomato. *Applied Ecology y Environmental Research*, 17(2).
8. Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H., y Gupta, K. (2015). Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445–473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
9. Al-Suhaibani, N., Selim, M., Alderfasi, A., y El-Hendawy, S. (2020). Comparative performance of integrated nutrient management between composted agricultural wastes, chemical fertilizers, and biofertilizers in improving soil quantitative and qualitative properties and crop yields under arid conditions. *Agronomy*, 10(10), 1503.
10. Anaya-Pérez, M. A., y Bautista-Zane, R. (2008). El nopal forrajero en México: Del siglo XVI al siglo XX. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 5(2), 167-183.
11. Arba, M., Paul, R., Choukrallah, R., Falisse, A., y Sindic, M. (2013). Effect of NP fertilizing on fruit yield and fruit quality of cactus pear. In *VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal*, 1067, 39-46.
12. Arribas, C., Cabellos, B., Sánchez, C., Cuadrado, C., Guillamón, E., y Pedrosa, M. M. (2017). The impact of extrusion on the nutritional composition, dietary fiber and in vitro digestibility of gluten-free snacks based on rice, pea and carob flour blends. *Food Function*, 8(10), 3654-3663.
13. Assefa, S., y Tadesse, S. (2019). The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity—a review. *Agri Research and Technology: Open Access Journal*, 22(2), 556192.

14. Astello, G. M. G., Cervantes, I., Nair, V., del Socorro Santos-Díaz, M., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., y de la Rosa, A. P. B. (2015). Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 119-130.
15. Baarsch, F., Granadillos, J. R., Hare, W., Knaus, M., Krapp, M., Schaeffer, M., y Lotze-Campen, H. (2020). The impact of climate change on incomes and convergence in Africa. *World Development*, 126, 104699. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104699>
16. Bariagabre, S. A., Asante, I. K., Gordon, C., y Ananng, T. Y. (2016). *Cactus pear (Opuntia ficus-indica L.): A valuable crop for restoration of degraded soils in northern Ethiopia*. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6(8), 11-18.
17. Barthod, J., Rumpel, C., y Dignac, M. F. (2018). Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2), 17.
18. Bautista-Justo, M., Pineda-Torres, R. I., Camarena-Aguilar, E., Alanís-Guzmán, G., Mota, D. V. M., y Barboza-Corona, J. E. (2010). El nopal fresco como fuente de fibra y calcio en panqués. *Acta Universitaria*, 20, 11-17. <https://doi.org/10.15174/au.2010.62>
19. Baweja, P., Kumar, S., y Kumar, G. (2020). Fertilizers and pesticides: Their impact on soil health and environment. *Soil health*, 265-285.
20. Bertran-Vilà, M., Pasquier Merino, A. G., y Villatoro Hernández, J. G. (2022). Food producers in the peri-urban area of Mexico City: A study on the linkages between social capital and food sustainability. *Sustainability*, 14(23), 15960.
21. Bhattacharyya, P. N., y Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350.
22. Bhunia, S., Bhowmik, A., Mallick, R., y Mukherjee, J. (2021). Agronomic efficiency of animal-derived organic fertilizers and their effects on biology and fertility of soil: A review. *Agronomy*, 11(5), 823.

23. Bona, E., Cantamessa, S., Massa, N., Manassero, P., Marsano, F., Copetta, A., Lingua, G., D'Agostino, G., Gamalero, E., y Berta, G. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting pseudomonads improve yield, quality and nutritional value of tomato: a field study. *Mycorrhiza*, 27, 1–11
24. Bona, E., Todeschini, V., Cantamessa, S., Cesaro, P., Copetta, A., Lingua, G., Gamalero, E., Berta, G., y Massa, N. (2018). Combined bacterial and mycorrhizal inocula improve tomato quality at reduced fertilization. *Scientia Horticulturae*, 234, 160-165.
25. Bona, E., Todeschini, V., Cantamessa, S., Cesaro, P., Copetta, A., Lingua, G., Gamalero, E., Berta, G., y Massa, N. (2018). Combined bacterial and mycorrhizal inocula improve tomato quality at reduced fertilization. *Scientia Horticulturae*, 234, 160-165.
26. Bonilla, R. P. E., Rebaza, F. G. A., Bustamante, L. E., Casas, M. L. E., Cirineo, R. M. X., Hinostroza, L. M. L., Villar, M. H. C., y Yupanqui, G. B. M. (2017). Determinación estructural de flavonoides en el extracto etanólico de cladodios de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. “Tuna Verde”. *Revista Peruana de Medicina Integrativa*, 2(4), 835-840.
27. Bouvier, J. M., y Campanella, O. H. (2014) Extrusion Processing Technology: Food and Non-Food Biomaterials; first edit.; ed; *John Wiley & Sons*: Oxford. Doi:10.1002/9781118541685.
28. Brilli, F., Pollastri, S., Raio, A., Baraldi, R., Neri, L., Bartolini, P., Podda, A., Loreto, F., Maserti, B. E., y Balestrini, R. (2019) Root colonization by *Pseudomonas chlororaphis* primes tomato (*Lycopersicum esculentum*) plants for enhanced tolerance to water stress. *Journal of Plant Physiology*, 232, 82–93.
29. Cantwell, M., Rodríguez-Félix, A., y Robles-Contreras, F. (1992). Postharvest physiology of prickly pear cactus. *Scientia Horticulturae*, 50, 1–9.
30. Capuano, E. (2017). The behavior of dietary fiber in the gastrointestinal tract determines its physiological effect. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(16), 3543–3564.

31. Castro, B. Y. G. (2022). Optimización del secado convectivo de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos y evaluación de parámetros de calidad [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Sinaloa].
32. Chalise, S., Naranpanawa, A., Bandara, J. S., y Sarker, T. (2017). A general equilibrium assessment of climate change-induced loss of agricultural productivity in Nepal. *Economic Modelling*, 62, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2017.01.014>
33. Chamoli, A., Bhambri, A., Karn, S. K., y Raj, V. (2024). Ammonia, nitrite transformations and their fixation by different biological and chemical agents. *Química y Ecología*, 40(2), 166-199.
34. Chang, J. D., Mantri, N., Sun, B., Jiang, L., Chen, P., Jiang, B., ... y Liang, Z. (2016). Effects of elevated CO₂ and temperature on *Gynostemma pentaphyllum* physiology and bioactive compounds. *Journal of Plant Physiology*, 196, 41-52.
35. Chávez, I. P. R., Méndez, F. D. J. C., y Rodríguez, P. A. (2023). Eficiencia de bioestimulante Algae Plus® en la producción y calidad de nopal verdura. *Ciencia del Suelo*.
36. Chen, W., Bastida, F., Liu, Y., Zhou, Y., He, J., Song, P., Kuang, N., y Li, Y. (2023). Nanobubble oxygenated increases crop production via soil structure improvement: The perspective of microbially mediated effects. *Agricultural Water Management*, 282, 108263.
37. Chinchay, L. S. L. (2015). Buenas prácticas agrícolas: Uso de los fertilizantes nitrogenados en la minimización de la emisión de gases de efecto. *Revista Científica Ingetecno*, 4(1).
38. Choque-Quispe, D., Diaz-Barrera, Y., Solano-Reynoso, A. M., Choque-Quispe, Y., Ramos-Pacheco, B. S., Ligarda-Samanez, C. A., Peralta-Guevara, D. E., Martínez-Huamán, E. L., Aguirre Landa, J. P., Correa-Cuba, O., Agreda Cerna, H. W., Masco-Arriola, M. L., Lechuga-Canal, W. J., Loayza-Céspedes, J. C., y Álvarez-López, G. J. (2022). Effect of the application of a coating native potato starch/nopal mucilage/pectin on physicochemical and physiological properties during storage of

- Fuerte and Hass avocado (*Persea americana*). *Polymers*, 14(16), 3421.
<https://doi.org/10.3390/polym14163421>
39. Choton, S., Gupta, N., Bandral, J. D., Anjum, N., y Choudary, A. (2020). Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 9(2), 162-168.
40. Contreras-Padilla, M., Gutiérrez-Cortez, E., Valderrama-Bravo, M. D. C., Rojas-Molina, I., Espinosa-Arbeláez, D. G., Suárez-Vargas, R., y Rodríguez-García, M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67, 44-49.
41. Contreras-Padilla, M., Rodríguez-García, M. E., Gutiérrez-Cortez, E., Valderrama-Bravo, M. C., Rojas-Molina, J. I., y Rivera-Muñoz, E. M. (2016). Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus* mucilage at three different maturity stages of cladode. *European Polymer Journal*, 78, 226-234.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.03.024>
42. Costa, O. Y., Raaijmakers, J. M., y Kuramae, E. E. (2018). Microbial extracellular polymeric substances: ecological function and impact on soil aggregation. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1636.
43. Courtney, R. G., y Mullen, G. J. (2008). Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types. *Bioresource Technology*, 99, 2913-2918. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.045>
44. Czubinski, J., y Dwiecki, K. (2017). A review of methods used for investigation of protein–phenolic compound interactions. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(3), 573-585.
45. Day, L., y Swanson, B. G. (2013). Functionality of protein-fortified extrudates. *Comprehensive Reviews in Food Science y Food Safety*, 12(5), 546-564.
46. Del Carmen Orozco-Mosqueda, M., Glick, B. R., y Santoyo, G. (2020). ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): An efficient mechanism to counter salt stress in crops. *Microbiological Research*, 235, 126439.
47. di Bella, G., Vecchio, G. L., Albergamo, A., Nava, V., Bartolomeo, G., Macrì, A., Bacchetta, L., lo Turco, V., y Potorti, A. G. (2022). Chemical characterization of

- Sicilian dried nopal [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104307.
48. do Nascimento, D. B., Magalhães, A. L. R., de Araújo, G. G. L., da Rocha, A. T., Oliveira, G. F. d., de Macedo, A., Araújo, C. d. A., Nagahama, H. d. J., da Silva, T. G. F., Turco, S. H. N., Souza, R. T. d. A., Gois, G. C., y Campos, F. S. (2024). Productive, morphological, and nutritional indicators of cactus pear in a semiarid region. *Agronomy*, 14(10), 2366. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102366>
49. Donato, P. E., Donato, S. L., Silva, J. A., Pires, A. J., Rosa, R. C., y Aquino, A. A. (2016). Nutrition and yield of ‘Gigante’ cactus pear cultivated with different spacings and organic fertilizer. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20, 1083-1088.
50. Donato, P. E., Pires, A. J., Donato, S. L., Bonomo, P., Silva, J. A., y Aquino, A. A. (2014). Morfometría y rendimiento de cactus forrajero 'Gigante' bajo diferentes espaciamientos y dosis de fertilizante orgánico. *Revista Brasileña de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 151-158.
51. Dubeux, J. C. B., dos Santos, M. V. F., de Andrade Lira, M., dos Santos, D. C., Farias, I., Lima, L. E., y Ferreira, R. L. C. (2006). Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in north-east Brazil. *Journal of Arid Environments*, 67(3), 357–372. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.01>
52. Dubeux, J. C. B., Santos, M. V. F. dos, Cunha, M. V. da, Santos, D. C. dos, Souza, R. T. de A., Mello, A. C. L. de, y Souza, T. C. de. (2021). Cactus (*Opuntia and Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 275, 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
53. Elizondo, A. E. (2010). Evaluación del efecto de dietas formuladas con o sin harinas de origen animal en el rendimiento de pollos de engorde. [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
54. El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19, 14879–14901.

55. Emmanuel, O. C., y Babalola, O. O. (2020). Productivity and quality of horticultural crops through co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting bacteria. *Microbiological Research*, 239, 126569.
56. Erokhin, V., Diao, L., Gao, T., Andrei, J. V., Ivolga, A., y Zong, Y. (2021). The supply of calories, proteins, and fats in low-income countries: A four-decade retrospective study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 7356.
57. Eswaran, S., Muir, J., y Chey, W. D. (2013). Fiber and functional gastrointestinal disorders. *American Journal of Gastroenterology*, 108(5), 718-727.
58. Falco, C., Galeotti, M., y Olper, A. (2019). Climate change and migration: Is agriculture the main channel? *Global Environmental Change*, 59, 101995. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101995>
59. FAO. (2017). Es hora de poner cactus en el menú. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el 29 de mayo de 2022 de <https://cutt.ly/3GTRi1y>
60. FAO. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Recuperado el 14 de agosto de 2023 de <https://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>
61. Fatemi-Nick, F., Azizi, K., Ghasemi, S., y Akbarpour, O. (2023). The effect of using of different levels of biological, chemical and manure fertilizers on macro elements and some quantitative traits of forage cactus (*Opuntia ficus-indica* L.) *Plant Productions*, 46(2), 185-198. <https://doi.org/10.22055/ppd.2023.43071.2084>
62. Fernández Pavía, Y. L., García Cué, J. L., López Jiménez, A., y Mora Aguilera, G. (2015). Inducción de deficiencias nutrimentales en nopal verdura *Opuntia ficus-indica* (L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1417-1422.
63. Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero (FND). (2020). El nopal, un alimento muy mexicano. Recuperado de <https://www.gob.mx/fnd/articulos/el-nopal-un-alimento-muy-mexicano?idiom=es>
64. Flores, O. M. A., y Reveles, H. M. (2010). Producción de nopal forrajero de diferentes variedades y densidades de plantación. *RESPYN. Edición Especial*, (5), 198-210.
65. Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, United Nations Children's Fund, World Food Programme,

- y World Health Organization. (2020). The State of Food Security and Nutrition in the World 2020: Transforming Food Systems for Affordable Healthy Diets. FAO.
66. Forni, C., Duca, D., y Glick, B. R. (2017). Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria. *Plant and Soil*, 410, 335–356.
67. García, S. M. D., y Serrano, H. (2022). Los nopales *Opuntia spp.* y los frutos de otras cactáceas. Recuperado de <https://tecnoagro.com.mx/no.-157/os-nopales-opuntia-spp-y-los-frutos-de-otras-cactaceae>.
68. Gardezi, A. K., Márquez Berber, S. R., Flores Magdaleno, H., Flores Gallardo, H., Santoyo de la Cruz, M. F., López Buenfil, J. A., Ortega Escobar, H. M., García Martínez, H., Escalona Maurice, M. J., Meraz Maldonado, N., Larque Saavedra, M. U., y Haro Aguilar, G. (2022). Efecto de la endomicorriza (*Glomus intrarradices*) y materia orgánica en nopal tunero (*Opuntia albicarpa*) en dos tipos de suelo. *Nova Scientia*, 14(29), 1-13. <https://doi.org/10.21640/ns.v14i29.3049>
69. Gebretsadik, G., Animut, G., y Tegegne, F. (2013). Assessment of the potential of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) as livestock feed in Northern Ethiopia. *Livestock Research for Rural Development*, 25(2), 1-10.
70. Goettsch, B., Durán, A. P., y Gaston, K. J. (2019). Global gap analysis of cactus species and priority sites for their conservation. *Conservation Biology*, 33(2), 369-376.
71. Gorshkova, T., Brutch, N., Chabbert, B., Deyholos, M., Hayashi, T., y Lev-Yadun, S. (2012). Plant fiber formation: State of the art, recent expected progress, and open questions. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 31, 201–228.
72. Grünwaldt, J. M., Guevara, J. C., Grünwaldt, E. G., y Carretero, E. M. (2015). *Cacti (Opuntia spp.) as forage in Argentina dry lands*. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(1), 263-282.
73. Guevara, J. C., Felker, P., Balzarini, M. G., Páez, S. A., Estevez, O. R., Páez, M. N., y Antúnez, J. C. (2011). Productivity, cold hardiness and forage quality of spineless progeny of the *Opuntia ficus-indica* 1281 × *O. lindheimerii* 1250 cross in Mendoza plain, Argentina. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 13, 48-62.

74. Guevara, J. C., Yahia, E. M., y Brito de la Fuente, E. (2003). Effects of elevated concentrations of CO₂ in modified atmosphere packaging on the quality of prickly pear cactus stems (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biology and Technology*, 29(2), 167–176.
75. Guhra, T., Stolze, K., y Totsche, K. U. (2022). Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 164, 108483.
76. Guo, X. X., Liu, H. T., y Wu, S. B. (2019). Humic substances developed during composting of organic wastes: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions. *Science of the Total Environment*, 662, 501-510.
77. Guzmán, L. D., y Chávez, J. (2007). Estudio bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el consumo humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 73(1), 41-45.
78. Hamad, S. H. (2012). Factors affecting the growth of microorganisms in food. *Progress in Food Preservation*, 405-427.
79. Hepperly, P., Lotter, D., Ulsh, C. Z., Seidel, R., y Reider, C. (2009). Compost, manure and synthetic fertilizer influences crop yields, soil properties, nitrate leaching and crop nutrient content. *Compost Science & Utilization*, 17(2), 117-126.
80. Hernández-Becerra, E., de los Ángeles Aguilera-Barreiro, M., Contreras-Padilla, M., Pérez-Torrero, E., y Rodríguez-García, M. E. (2022). Nopal cladodes (*Opuntia ficus-indica*): Nutritional properties and functional potential. *Journal of Functional Foods*, 95, 105183.
81. Horibe, T. (2019). Hydroponics of Edible Cactus (*Nopalea cochenillifera*): Effect of Cladode Size, Fertilizer Concentration and Cultivation Temperature on Daughter Cladode Growth and Development. *Environmental Control in Biology*, 57(3), 69-74.
82. Huang, X., Liu, H., Ma, Y., Mai, S., y Li, C. (2022). Effects of extrusion on starch molecular degradation, order–disorder structural transition and digestibility—A review. *Foods*, 11(16), 2538.

83. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Características principales del cultivo de nopal en el Distrito Federal: Caso Milpa Alta. Censo Agropecuario 2007*. México: INEGI.
84. Karthika, K. S., Rashmi, I., y Parvathi, M. S. (2018). Biological functions, uptake and transport of essential nutrients in relation to plant growth. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, 1-49.
85. Kaur, C., Selvakumar, G., y Ganeshamurthy, A. N. (2016). Organic acids in the rhizosphere: their role in phosphate dissolution. *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity. Functional Applications*, 2, 165-177.
86. Kintl, A., Šmeringai, J., Lošák, T., Huňady, I., Sobotková, J., Hrušovský, T., Varga, L., Vejražka, K., y Elbl, J. (2024). The effect of soil heterogeneity on the content of macronutrients and micronutrients in the chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Soil Systems*, 8, 75. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8030075>
87. Kumar, V., Pathania, N., Sharma, S., y Sharma, R. (2024). Dynamics of plant nutrient signaling through compost. *The Microbe*, 2, 100047.
88. Lahbouki, S., Anli, M., El Gabardi, S., Ait-El-Mokhtar, M., Ben-Laouane, R., Boutasknit, A., Ait-Rahou, Y., Outzourhit, A., Wahbi, S., y Douira, A. (2021). Evaluation of arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost supplementation on growth, phenolic content and antioxidant activity of prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*). *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 156.
89. Lakhdar, A., Falleh, H., Ouni, Y., Oueslati, S., Debez, A., Ksouri, R., y Abdelly, C. (2011). Municipal solid waste compost application improves productivity, polyphenol content, and antioxidant capacity of *Mesembryanthemum edule*. *Journal of Hazardous Materials*, 191(1-3), 373-379.
90. Leite, J. R. A., Sales, E. C. J. D., Monção, F. P., Guimarães, A. D. S., Rigueira, J. P. S., y Gomes, V. M. (2018). *Nopalea* cactus pear fertilized with nitrogen: Morphometric, productive and nutritional characteristics. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 40, e38325.

91. Littell, R. C., Henry, P. R., y Ammerman, C. B. (1998). Statistical analysis of repeated measures data using SAS procedures. *Journal of Animal Science*, 76, 1216-1231. <https://doi.org/10.2527/1998.7641216x>
92. Liu, G., Ying, D., Guo, B., Cheng, L. J., May, B., Bird, T., Sanguansri, L., Caa, Y., y Augustin, M. A. (2019). Extrusion of apple pomace increases antioxidant activity upon in vitro digestion. *Food Function*, 10, 951–963.
93. Liu, N., Zhao, J., Du, J., Hou, C., Zhou, X., Chen, J., y Zhang, Y. (2024). Non-phytoremediation and phytoremediation technologies of integrated remediation for water and soil heavy metal pollution: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 174237.
94. Loor, N. (2016). Fundamentos de los alimentos peletizados en la nutrición animal. *Revista Científica Dominios de la Ciencia*, 2(4), 323-333.
95. Maçik, M., Gryta, A., y Frąc, M. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advances in Agronomy*, 162, 31-87.
96. Maitra, S., Brestic, M., Bhadra, P., Shankar, T., Praharaj, S., Palai, J. B., Shah, M. M. R., Barek, V., Ondrisik, P., Skalický, M., y Hossain, A. (2021). Bioinoculants—Natural biological resources for sustainable plant production. *Microorganisms*, 10(51). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010051>
97. Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., y Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1), 31-51.
98. Maurya, A. K., y Said, P. P. (2014). Extrusion processing on physical and chemical properties of protein-rich products: An overview. *Journal of Bioresource Engineering and Technology*, 2(4), 61-67.
99. Mayer, J. A., y Cushman, J. C. (2019). Nutritional and mineral content of prickly pear cactus: A highly water-use efficient forage, fodder and food species. *Journal of Agronomy and Crop Science*. <https://doi.org/10.1111/jac.12353>

100. Mitter, B., Brader, G., Afzal, M., Compant, S., Naveed, M., Trognitz, F., y Sessitsch, A. (2013). Avances en la elucidación de interacciones beneficiosas entre plantas, suelo y bacterias. *Advances in Agronomy*, 121, 381-445.
101. Miyamoto, H., Shigeta, K., Suda, W., Ichihashi, Y., Nihei, N., Matsuura, M., Tsuboi, A., Tominaga, N., Aono, M., Sato, M., Taguchi, S., Nakaguma, T., Tsuji, N., Ishii, C., Matsushita, T., Shindo, C., Ito, T., Kato, T., Ohno, H., Kurotani, A., Shima, H., Moriya, S., Horiuchi, S., Satoh, T., Mori, K., Nishiuchi, T., Miyamoto, H., Hattori, M., Kodama, H., Kikuchi, J., y Hirai, Y. (2022). Agricultural quality matrix-based multiomics structural analysis of carrots in soils fertilized with thermophile-fermented compost. *bioRxiv*.
102. Naik, K., Mishra, S., Srichandan, H., Singh, P. K., y Sarangi, P. K. (2019). Plant growth-promoting microbes: Potential link to sustainable agriculture and environment. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21, 101326.
103. Navale, S. A., Swami, S. B., y Thakor, N. J. (2015). Extrusion cooking technology for foods: A review. *Journal of Ready to Eat Food*, 2(3), 66-80.
104. Neffar, S., Beddiar, A., y Chenchouni, H. (2015). Effects of soil chemical properties and seasonality on mycorrhizal status of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) planted in hot arid steppe rangelands. *Sains Malaysiana*, 44(5), 671-680.
105. Nikmaram, N., Leong, S. Y., Koubaa, M., Zhu, Z., Barba, F. J., Greiner, R., Oey, I., y Roohinejad, S. (2017). Effect of extrusion on antinutritional factors in food products: An overview. *Food Control*, 79, 62-73.
106. Ortiz, R. R., Ahumada, G. J. T., Pérez, S. R. E., García, S. P. A., Martínez, F. H. E., y Val, A. D. (2022). Evaluation of physicochemical changes of nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 24, 242-253.
107. Ouédraogo, E., Mando, A., y Zombré, N. P. (2001). Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 84(3), 259-266. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00246-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00246-2)

108. Ozdal, T., Capanoglu, E., y Altay, F. (2013). A review on protein–phenolic interactions and associated changes. *Food Research International*, 51(2), 954-970.
109. Pagare, S., Bhatia, M., Tripathi, N., Pagare, S., y Bansal, Y. K. (2015). Secondary metabolites of plants and their role: Overview. *Current Trends in Biotechnology and Pharmacy*, 9(3), 293-304.
110. Pasa, E. H., Weinert, C., Ferreira, J. P., Ferreira, H. T., Martinez, F. P., Pedó, T., da Silveira Pasa, M., y Carlos, F. S. (2024). Ammonium nitrate fertilization increases the crude protein content and wheat grain yield in subtropical conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-13.
111. Paulino, P. A. J. (2020). Efectos de la peletización en aves y cerdos. *Engormix*. <https://www.engormix.com/avicultura/articulos/efectos-peletizacion-aves-cerdos-t45110.htm>
112. Peña-Valdivia, C. B. C., Trejo, L. V. B., Arroyo-Peña, A., Sánchez U., R., y Balois M. (2012). Diversity of unavailable polysaccharides and dietary fiber in domesticated nopalito and cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Chemistry y Biodiversity*, 9, 1599-1610.
113. Pérez, I. (2021). Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
114. Pérez-Viveros, D. J., Díaz-Batalla, L., Navarro-Cortez, R. O., Palma-Rodríguez, H. M., y Hernández-Urbe, J. P. (2024). Effect of extrusion on physicochemical and functional properties of cladode flour from *Opuntia cochenillifera* and *Opuntia ficus-indica*. *Applied Food Research*, 4(2), 1005.
115. Prat, L.; Nicolás, F.; Sudzuki, F. (2017). Morphology and anatomy of *Platyopuntiae*. In *Crop Ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear*; Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A., Saenz, C., Eds. FAO, Rome, Italy, 21–28.
116. Rajkumar, U., Rama Rao, S. V., Raju, M. V. L. N., y Chatterjee, R. N. (2021). Backyard poultry farming for sustained production and enhanced nutritional and livelihood security with special reference to India: A review. *Tropical Animal Health and Production*, 53(1), 176.

117. Rakic, L. (2013). *Feed structure: Effects on physical quality of the feed, chemical status of the feed and nutritional consequence* (Master's thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås).
118. Reimer, M., Kopp, C., Hartmann, T., Zimmermann, H., Ruser, R., Schulz, R., Müller, T., y Möller, K. (2023). Assessing long-term effects of compost fertilization on soil fertility and nitrogen mineralization rate. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186, 217–233.
119. Robin, F., Schuchmann, H. P., y Palzer, S. (2012). Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science y Technology*, 28(1), 23-32.
120. Rodrigues, L. E. A., y Queires, L. C. S. (2015). A new mineral fertilizer for cacti and other succulents cultivated in restricted artificial environments. *Ornamental Horticulture*, 21(1), 99-104.
121. SADER. (2022). *Plantación de nopal forrajero, una opción más para luchar contra la sequía*. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/plantacion-de-nopal-forrajero-una-opcion-mas-para-luchar-contra-la-sequia>
122. Sadras, V. O., Fereres, E., Borrás, L., Garzo, E., Moreno, A., Araus, J. L., y Fereres, A. (2020). Aphid resistance: An overlooked ecological dimension of nonstructural carbohydrates in cereals. *Frontiers in Plant Science*, 11, 937.
123. Sadras, V., Vázquez, C., Garzo, E., Moreno, A., Medina, S., Taylor, J., y Fereres, A. (2021). The role of plant labile carbohydrates and nitrogen on wheat-aphid relations. *Scientific Reports*, 11(1), 12529.
124. SAGARPA-SIAP. (2015). Anuario estadístico de la Producción Agrícola. Ciclo: cíclicos y perenes 2013. Modalidad: riego + temporal. *Recuperado de* <http://www.siap.gob.mx/>
125. Saia, S., Aissa, E., Luziatelli, F., Ruzzi, M., Colla, G., Ficca, A. G., Cardarelli, M., y Rouphael, Y. (2020). Growth-promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi differentially benefit tomato and corn depending upon the supplied form of phosphorus. *Mycorrhiza*, 30, 133–147.

126. Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., y Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69, 136-153.
127. Sánchez-Pérez, S., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., de Tapia, E. M., Golyeva, A., Prado, B., y Ibarra-Morales, E. (2013). The black San Pablo paleosol of the Teotihuacan Valley, Mexico: Pedogenesis, fertility, and use in ancient agricultural and urban systems. *Geoarchaeology*, 28(3), 249-267.
128. Santiago-Lorenzo, M. del R., López-Jiménez, A., Saucedo-Veloz, C., Cortés-Flores, J. I., Jaén-Contreras, D., y Suárez-Espinosa, J. (2016). Composición nutrimental del nopal verdura producido con fertilización mineral y orgánica. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(4), 403-407
129. Santos, M. D., Barba de la Rosa, S., Hélies, A., Guéraud, T. C., y Négre-Salvayré, F. (2017). *Opuntia spp, Characterization and Benefits in Chronic Diseases*. Hindawi, 1-17.
130. Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2018). *Desperdicio de alimentos en México*.
http://www.sedesol.gob.mx/boletinesSinHambre/Informativo_02/infografia.htm
131. Serra, N. (2020). Mejorando la calidad del pellet, la clave para un buen rendimiento. *Engormix*. <https://www.engormix.com/avicultura/articulos/mejorando-calidad-pellet-clave-t46194.htm>
132. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2017). *México: Gobierno de México*. Recuperado de <http://www.gob.mx/siap/>
133. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). *Cierre de la producción anual agrícola (1980-2018)*. <https://cutt.ly/0mFWnz8>
134. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). ¡Y el nopal ingresó en la dieta simbólica y real de los mexicanos! Cifras y datos sobre esta ancestral planta. <https://www.gob.mx/siap/articulos/y-el-nopal-ingreso-en-la-dieta-simbolica-y-real-de-los-mexicanos>

135. Shah, A., y Smith, D. L. (2020). Flavonoids in agriculture: Chemistry and roles in biotic and abiotic stress responses, and microbial associations. *Agronomy*, 10(8), 1209.
136. Shelar, G. A., y Gaikwad, S. T. (2019). Extrusion in food processing: An overview. *The Pharma Innovation Journal*, 8(2), 562-568.
137. Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., y Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 383, 132531.
138. Shofian, N. M., Hamid, A. A., Osman, A., Saari, N., Anwar, F., Pak Dek, M. S., y Hairuddin, M. R. (2011). Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(7), 4678-4692.
139. Silva, J. A. D., Donato, S. L., Donato, P. E., Souza, E. D. S., Padilha Júnior, M. C., y Júnior, S. (2016). Yield and vegetative growth of cactus pear at different spacings and under chemical fertilizations. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20, 564-569.
140. Silva, J. A., Bonomo, P., Donato, S. L. R., Pires, A. J. V., Silva, F. F., y Donato, P. E. R. (2022). Composição bromatológica de palma forrageira cultivada em diferentes espaçamentos e adubações química. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 8(2), 342-350. <https://doi.org/10.5039/agraria.v8i2a2431>
141. Silva, M. S., Nóbrega, J. S., Santos, C. C., Costa, F. B., Abreu, D. C., Silva, W. M., Hoshida, A. K., Gomes, F. A. L., Pereira, U. S., Linné, J. A., y Scalón, S. P. Q. (2023). Organic fertilization with biofertilizer alters the physical and chemical characteristics of young cladodes of *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. *Sustainability*, 15(4), 3841. <https://doi.org/10.3390/su15043841>
142. Silva, N. G. D. M. E., Santos, M. V. F. D., Dubeux Júnior, J. C. B., Cunha, M. V. D., Lira, M. D. A., y Ferraz, I. (2016). Effects of planting density and organic fertilization doses on productive efficiency of cactus pear. *Revista Caatinga*, 29, 976-983.
143. Singh, S. K., Barnaby, J. Y., Reddy, V. R., y Sicher, R. C. (2016). Varying response of the concentration and yield of soybean seed mineral elements, carbohydrates,

- organic acids, amino acids, protein, and oil to phosphorus starvation and CO₂ enrichment. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1967.
144. Singh, S., Gamlath, S., y Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science y Technology*, 42(8), 916-929.
145. Snyman, H. A. (2013). Tasa de crecimiento y eficiencia en el uso del agua de las tunas *Opuntia ficus-indica* y *O. robusta*. *Arid Land Research and Management*, 27(4), 337-348.
146. Talimbay, J. E., y Finez, D. D. E. (2023). Evaluating the efficacy and impact of inorganic fertilizers on rice cultivation: A comparative study with organic fertilizers. *International Journal of Academic and Practical Research*, 2(2), 1-1.
147. Tavera-Cortés, M. E., Escamilla-García, P. E., y Pérez-Soto, F. (2018). Impacts on productivity through sustainable fertilization of nopal (*Opuntia ficus-indica*) crops using organic compost. *Journal of Agricultural Science*, 10(4), 297. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n4p297>
148. Thakur, N., Ray, A. P., Sharp, L., Jin, B., Duong, A., Pour, N. G., Obeng, S., Wijesekara, A. V., Gao, Z.-G., McCurdy, C. R., Jacobson, K. A., Lyman, E., y Eddy, M. T. (2023). Anionic phospholipids control mechanisms of GPCR-G protein recognition. *Nature Communications*, 14, 794.
149. Tlelo-Cuautle, A. M., Taboada-Gaytán, O. R., Cruz-Hernández, J., López-Sánchez, H., y López, P. A. (2020). Efecto de la fertilización orgánica y química en el rendimiento de fruto de chile Poblano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(3), 283-289.
150. Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. de L., y 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), 1129-1142.
151. Tripathi, S., Srivastava, P., Devi, R.S. (2020). Bhadouria, R. Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation: Pesticides and Chemical Fertilisers*; Prasad, M.N.V., Ed. *Butterworth-Heinemann*. Oxford, UK, 25–54.

152. Tsegaye, Z., Alemu, T., Desta, F. A., y Assefa, F. (2022). Plant growth-promoting rhizobacterial inoculation to improve growth, yield, and grain nutrient uptake of teff varieties. *Frontiers in Microbiology*, 13, 896770.
153. Vasanathan, T., Gaosong, J., Yeung, J., y Li, J. (2002). Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chemistry*, 77(1), 35-40.
154. Vázquez Mendoza, P., Sousa, T. C. de, Santos, M. V. F. dos, Vázquez Mendoza, O. V., Batista Dubeux Junior, J. C., y Lira, M. de A. (2019). Morfología de nopal forrajero cv Miúda (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) en sistemas de cultivo del agreste de Pernambuco, Brasil. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(3), 756-766. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i3.4386>
155. Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R., y Ahmad, N. (2021). Controlled release fertilizer: A review on developments, applications, and potential in agriculture. *Journal of Controlled Release*, 339, 321-334.
156. Wong, W. S., Tan, S. N., Ge, L., Chen, X., y Yong, J. W. H. (2015). The importance of phytohormones and microbes in biofertilizers. *Bacterial metabolites in sustainable agroecosystem*, 105-158.
157. Wood, S. A., Jina, A. S., Jain, M., Kristjanson, P., y DeFries, R. S. (2014). Smallholder farmer cropping decisions related to climate variability across multiple regions. *Global Environmental Change*, 25, 163-172.
158. Xu, G., Fan, X., y Miller, A. J. (2012). Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 63(1), 153-182.
159. Yadav, M. R., Kumar, R., Parihar, C. M., Yadav, R. K., Jat, S. L., Ram, H., Meena, R. K., Singh, M., Birbal, Verma, A. P., Kumar, U., Ghosh, A., y Jat, M. L. (2017). Strategies for improving nitrogen use efficiency: A review. *Agricultural Reviews*, 38, 29-40.
160. Yi, C., Qiang, N., Zhu, H., Xiao, Q., y Li, Z. (2022). Extrusion processing: A strategy for improving the functional components, physicochemical properties, and health benefits of whole grains. *Food Research International*, 160, 111681.
161. Naserzadeh, Y., Nafchi, A. M., Mahmoudi, N., Nejad, D. K., Gadzhikurbanov, A. S. (2019). Effect of combined use of fertilizer and plant growth stimulating bacteria

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

Rhizobium, Azospirillum, Azotobacter and Pseudomonas on the quality and components of corn forage in Iran. *RUDN J. Agron. Anim. Indust.*, 14, 209–224.

13. Anexos

Manuel Galvan Aguilar

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficu

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trncoid::3117-431060871

Fecha de entrega
17 feb 2025, 9:17 a.m. GMT-6

Fecha de descarga
17 feb 2025, 9:19 a.m. GMT-6

Nombre de archivo
Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficu....pdf

Tamaño de archivo
1.4 MB

99 Páginas

36,177 Palabras

199,202 Caracteres



Página 1 of 125 - Portada

Identificador de la entrega trncoid::3117-431060871

Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas

**Formato de Declaración de Originalidad
y Uso de Inteligencia Artificial**
Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de Inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 86, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas	
Título del trabajo	Efecto de la biofertilización y del proceso de extrusión del nopal verdura y forrajero (Opuntia ficus-indica) sobre sus características bromatológicas, fitoquímicas y morfológicas.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Manuel Galván Aguilar	163721Bg@umich.mx
Director	Rosa Elena Pérez Sánchez	rosa.perez@umich.mx
Codirector	Jaime Espino Valencia	jaime.espino@umich.mx
Coordinador del programa	Daniel Val Arreola	dval@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	SI	Búsqueda de conceptos, conectores, sinónimos, y palabras para la redacción.

**Formato de Declaración de Originalidad
y Uso de Inteligencia Artificial**
Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	SI	Corrección de algunas referencias.
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Manuel Galván Aguilar
Lugar y fecha	Morelia Michoacán. 14 de febrero de 2025