

Morfometría de cladodios de nopal cultivado en Santander – Colombia: estudio exploratorio

Cladodes morphometry grown in Santander – Colombia: an exploratory study

Adriana Patricia Ramírez-Castaño^a  aramirez887@unab.edu.co; Francisco Javier León^a  fleon2@unab.edu.co;
Yudy Mariana Alfaro-Wisaquillo^b  yalfaro321@unab.edu.co; Rafael Mariano Alvarez-Quintero^c  ralvarezq@ces.edu.co;
Paola Andrea Zapata-Ocampo^c  opazapata@ces.edu.co

^aUniversidad Autónoma de Bucaramanga, Santander – Colombia. Facultad de Estudios Técnicos y Tecnológicos. Regencia de Farmacia.

^bUniversidad Autónoma de Bucaramanga, Santander – Colombia. Facultad de Estudios Técnicos y Tecnológicos. Gestión Gastronómica – Gastronomía y Alta Cocina.

^cUniversidad CES, Bucaramanga – Colombia. Facultad de Ciencias y Biotecnología. Química Farmacéutica.

Recibido: 07/06/2023 Aceptado: 20/10/2023

Citar, APA: Ramírez-Castaño, A. P., León, F. J., Alfaro-Wisaquillo, Y. M., Alvarez-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>

Resumen El nopal, es una planta carnosa con propiedades nutricionales y terapéuticas ampliamente investigada a nivel industrial. En Colombia, se cultiva en abundancia en el municipio de La Mesa de los Santos-Santander, gracias a las condiciones desérticas de la zona. El propósito principal de este estudio fue llevar a cabo una detallada caracterización morfométrica del cladodio de nopal, que es una rama del cactus, con apariencia de hoja y analizar las propiedades nutricionales y microbiológicas de la harina producida a partir de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Por lo cual, se procesaron un total de 108 cladodios, con longitud superior a los 30 cm, analizando las variables: peso, longitud y grosor. Adicionalmente, se determinaron valores bromatológicos como ceniza, humedad, fibra cruda, calcio, acidez y proteína. La presencia de microorganismos se determinó por medio de recuento de microorganismos aerobios; identificación de bacterias aerobias y anaerobias; análisis de levaduras y algunos hongos. Los resultados del análisis morfométrico revelaron una correlación significativa entre el peso; el ancho (con un coeficiente de correlación $r = 0,80$) y la longitud vertical de los cladodios del nopal ($r = 0,72$). En cuanto a la caracterización bromatológica de la harina de nopal, los valores obtenidos fueron: humedad 11,7%, ceniza 15,4 %, grasa 2,3 %, proteína 6,2 %, fibra cruda 8,2 %, carbohidratos totales 64,22 %, acidez 0,12 %. En cuanto al análisis microbiológico de la harina de nopal se reportan valores por debajo de los límites permitidos para presencia de microorganismos aerobios mesófilos, coliformes totales, *Escherichia coli*, mohos y levaduras. Este estudio permite tener información base sobre el cultivo de nopal producido en La Mesa de los Santos – Santander, develando su potencial alimenticio sustentado en el análisis morfométrico, al estimar el peso de los cultivos sin causarles daño, y complementado con el análisis nutricional. Estos hallazgos son de gran relevancia a nivel local, por lo cual se espera que futuras investigaciones promuevan el uso y profundización del conocimiento de esta planta.

Palabras clave: análisis bromatológico, análisis de componente principal, *Opuntia*, productos agrícolas, valor nutritivo.

Abstract The prickly pear, a fleshy plant with widely researched nutritional and therapeutic properties at the industrial level, is cultivated abundantly in the municipality of La Mesa de los Santos-Santander in Colombia, because to the arid conditions of the area. The main purpose of this study was to carry out a detailed morphometric characterization of the nopal cladode, which is a cactus branch resembling a leaf, and to analyze the nutritional and microbiological properties of the flour produced from *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. A total of 108 cladodes, each with a length greater than 30 cm, were processed, analyzing variables such as weight, length, and thickness. Additionally, bromatological values, including ash content, moisture, crude fiber, calcium, acidity, and protein, were determined. The presence of microorganisms was assessed through aerobic microorganism counts, identification of aerobic and anaerobic bacteria, yeast, and fungi analysis. The results of the morphometric analysis revealed a significant correlation between weight and width (with a correlation coefficient of $r = 0,80$) and the vertical length of the nopal cladodes ($r = 0,72$). Regarding the bromatological characterization of nopal flour, the obtained values were as follows: moisture 11,7 %, ash 15,4 %, fat 2,3 %, protein 6,2 %, crude fiber 8,2 %, total carbohydrates 64,22 %, and acidity 0,12 %. As for the microbiological analysis of nopal flour, values were reported below the allowed limits for mesophilic aerobic microorganisms, total coliforms, *E. coli*, molds, and yeasts. This study provides fundamental information about nopal cultivation in La Mesa de los Santos – Santander, highlighting its potential as a food source through morphometric analysis, by estimating the weight of the crops without causing damage to them, in addition to nutritional analysis. These findings are of great local significance, and it is hoped that future research will promote the use and further knowledge of this plant.

Keywords: agricultural products, bromatological analysis, principal component analysis, *Opuntia*, nutritional value.

Introducción

El nopal pertenece a la familia Cactaceae y al género *Opuntia*, el nombre fue asignado por Tournefort en 1700, dada su similitud con una planta espinosa originaria de la ciudad de Opus en Grecia (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2018). Este cactus ha suscitado el interés de muchas culturas durante miles de años, los antiguos habitantes de Mesoamérica iniciaron su cultivo de manera sistemática en regiones semiáridas de México en la Gran Tenochtitlán (capital del Imperio Azteca). España fue la puerta de entrada a Europa durante la conquista de México y de allí se expandió su cultivo por toda la región mediterránea y desde allí hacia África, Asia y Oceanía (Sáenz *et al.*, 2006).

La especie de cactus *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller se destaca por su valor nutricional, y por su versatilidad en la gastronomía, así como en la medicina tradicional en varias regiones del mundo. El nopal se considera como un alimento que tiene alto valor nutricional, fundamentado por su contenido en minerales, proteínas y fibra dietética (Feugang *et al.*, 2006). Además, el nopal contiene sustancias bioactivas y fitoquímicas de interés farmacéutico, dado que ha demostrado tener efectos terapéuticos positivos en pacientes con enfermedades cardiovasculares al exhibir propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Como dato adicional su cultivo es beneficioso al aumentar la biomasa en áreas agrícolas (Brinker, 2009; Budinsky *et al.*, 2001; El Kossori *et al.*, 1998; Gouws *et al.*, 2019; Kashif *et al.*, 2022; Torres-Ponce *et al.*, 2015)

Del nopal suelen aprovecharse partes como: las flores, los frutos o tunas y los cladodios o pencas, que son los tallos articulados y suculentos, en donde se realiza la fotosíntesis, por lo tanto, son las hojas modificadas que se encuentran protegidos por una cutícula gruesa,

y por espinas que ayudan a reducir la pérdida de agua (Sáenz *et al.*, 2006).

En el caso mexicano más allá de satisfacer la demanda interna, el nopal es una fuente significativa de divisas para el país debido a sus exportaciones, principalmente a los Estados Unidos, así como a países de Europa y Asia (Corzo-Rios *et al.*, 2016). Este éxito en la producción y exportación se debe en gran medida a la cultura del consumo, el conocimiento ancestral de la hortaliza y la tecnificación de la producción de dos cultivares específicos, conocidos como 'Milpa Alta' y 'Atlixco', también denominado 'Negrito', ambos pertenecientes a la especie *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Gallegos-Vázquez *et al.*, 2006; López *et al.*, 2018)

En Colombia, contrario a lo que sucede en México no se evidencia un impacto importante de los cultivos de nopal en la economía de las regiones que lo producen, siendo el caso del municipio Mesa de los Santos - Santander donde no existe registro científico actual que referencie temáticas de producción y sostenimiento de esta especie aun cuando su cultivo es alto. De allí la importancia de realizar una caracterización específica de este cactus lo cual es crucial para conservar sus cultivos y así llevar a cabo investigaciones relacionadas con la supervisión de su crecimiento sin la necesidad de cortarlo (De Mello *et al.*, 2020).

Dado lo anteriormente descrito y la escasa información disponible sobre el nopal en Colombia, y particularmente en la región de Santander, se llevó a cabo este estudio exploratorio con el propósito de realizar una descripción morfológica de los cladodios, así como un análisis microbiológico y bromatológico del polvo obtenido de la especie de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cultivada en esta región. Este estudio representa un primer acercamiento para comprender mejor las características y

posibles aplicaciones de esta verdura en esta región de Colombia.

Materiales y métodos

Obtención de muestras

La recolección de los cladodios (tallos con un grosor de 1 a 1,5 cm) se realizó a partir de cultivos artesanales de nopal que presentaban una edad de 1 a 2 años (Figura 1), los durante los meses de junio a agosto de 2019. La zona del estudio se ubicó en la región semiárida del cañón del río Chicamocha - vereda Regadero Bajo del municipio de Los Santos, departamento de Santander. Este sitio se encuentra a una altitud de 1310 msnm y experimenta una temperatura promedio de 21 °C.

Análisis morfométrico

En el análisis morfométrico de los cladodios de nopal, se tomaron en cuenta múltiples características morfológicas. Estas características incluyeron el peso en gramos, así como la longitud (mayor o igual a 24 cm) y el grosor en centímetros (1 cm). Los puntos de medición fueron la longitud del eje vertical, el ancho del eje horizontal, el grosor derecho, el grosor izquierdo, el grosor apical, el grosor de la base, el color, el número de hileras de areolas en una cara del cladodio, las cicatrices y el color de la piel. Este enfoque permitió una evaluación detallada de las dimensiones y la estructura de los cladodios de nopal en estudio (Gallegos-Vázquez *et al.*, 2006).

Elaboración de la harina de nopal

Preparación de los cladodios

Los cladodios de nopal fueron sometidos a un proceso de limpieza y preparación riguroso para garantizar su asepsia. En primer lugar, se lavaron con agua por aspersión, con el objetivo de eliminar cualquier partícula de polvo, así como residuos de materia orgánica e impurezas. A continuación, se sumergieron en

una solución de hipoclorito de sodio a 100 ppm durante 3 - 5 minutos con fines de desinfección. Posteriormente, los cladodios se lavaron cuidadosamente con agua potable corriente y se dejaron secar a temperatura ambiente. Se procedió a la remoción de las espinas utilizando una pinza y, nuevamente, se llevó a cabo otro ciclo de lavado por aspersión para asegurar su completa limpieza. Posterior a esto, se cortaron en tiras longitudinales de 1 cm.

Una vez preparados, los cladodios se sometieron a un proceso de secado en un horno ChepTop Unox®. La temperatura de secado se mantuvo constante a 75 °C por un período de 10 horas. Cabe destacar que dicho horno, estaba equipado con cuatro ventiladores para asegurar una distribución uniforme del calor y un sistema de extracción de humedad, que contribuyó a acelerar el proceso de secado.

Una vez que los cladodios estuvieron completamente secos, se pulverizaron utilizando un Procesador de Alimentos KitchenAid®, modelo KFP0719BM. Posteriormente, se pesaron y se empacaron en bolsas de 250 a 300 gramos al vacío utilizando una máquina Henkelman®, referencia jumbo 30. Los productos finales se conservaron a temperatura ambiente y en condiciones de oscuridad para preservar su calidad y propiedades. Todo este procedimiento se realizó en la cocina Banú de la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

A continuación, se describe la metodología para el análisis bromatológico y microbiológico, procedimientos que fueron realizados por laboratorios externos certificados.

Análisis bromatológico

El análisis de las características bromatológicas de la harina de nopal se desarrolló considerando los siguientes métodos:

La humedad se determinó mediante el método gravimétrico de secado en estufa. La ceniza se evaluó utilizando el método gravimétrico por calcinación. La cantidad de grasa se extrajo utilizando el equipo Soxhlet y se determinó por este proceso de extracción con solvente. La proteína se cuantificó mediante el método Kjeldahl (Association of Official Agricultural Chemists [AOAC], 2000). La fibra cruda se evaluó siguiendo la metodología del Anexo B de la Norma Técnica Colombiana NTC 1363:2017 (NTC, 2017). Los carbohidratos totales y las calorías se calcularon mediante fórmulas matemáticas basadas en la Resolución 333 de 2011 del Ministerio de la Protección Social (MPS, 2011). El calcio se determinó en el remanente de las cenizas y se cuantificó utilizando espectrometría de absorción atómica, empleando como referencia el método oficial de la AOAC 985.35 (AOAC, 2005). Finalmente, la acidez se midió utilizando el método titulométrico de rutina y se expresó en términos de ácido málico.

Análisis microbiológico

Para evaluar la calidad de la muestra de harina, se realizaron varios análisis microbiológicos siguiendo estándares reconocidos. Primero, se llevó a cabo un recuento de microorganismos aerobios, expresado en Unidades Formadoras de Colonias (UFC), siguiendo las pautas establecidas por la Organización Internacional de Normalización ISO 4833-1:2013 (ISO, 2013). Además, se procedió a la identificación de formas vegetativas y esporas de bacterias aerobias y anaerobias utilizando el método detallado en la Norma Técnica Colombiana NTC 4516:2009 (NTC, 2009) para microbiología de alimentos y productos de alimentación animal. Así como el método horizontal para la detección y enumeración de coliformes, acompañado de la técnica del número más probable (NTC, 2009). Asimismo, se realizó un análisis específico de levaduras y algunos hongos utilizando el método ISO 21527-1:2008 (ISO, 2008). Por último, se efectuó una identificación de la presencia de

Salmonella utilizando el método ISO 6579-1:2017/Amd 1:2020 (ISO, 2020).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron empleando estadística descriptiva. Adicionalmente se usó una matriz de dispersión, histograma y correlación para evaluar las medidas morfométricas de los cladodios de nopal. Posteriormente se realizó un Análisis Factorial de Componentes Principales (A.F.C.P.) y para evaluar la idoneidad de los datos, se calcularon las medidas de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin y se realizó la prueba de esfericidad de Bartlett.

Se utilizaron dos programas estadísticos para llevar a cabo estos análisis: SPSS en su versión 25 (IBM Corp) y RStudio en su versión 1.3.959. En el proceso, se emplearon diversas librerías estadísticas, incluyendo ca (versión 0.71.1), ggplot2 (versión 3.3.2), factoextra (versión 1.0.7), FactoMineR (versión 2.3), Factosinyh (versión 2.2), y corrplot (versión 0.84).

Resultados y discusión

Análisis descriptivos

Se procesaron 108 cladodios de nopal con un peso total de 69,545 gramos. En la **Tabla 1** se muestran los datos descriptivos de los caracteres morfométricos de los cladodios de nopal.

Los cladodios de nopal se clasificaron de acuerdo con el Codex Stan 185 (Codex Alimentarius, [Codex], 1993), en las siguientes categorías según la longitud de los cladodios D (21 a 25 cm) el 0,9 %; E (25 a 30 cm) el 7,4 % y mayores de 30 cm el 91,7 %.

En cuanto a la calidad de los cladodios, se observaron varios tipos de defectos. El mayor porcentaje de defectos correspondió a las cicatrices con un 28 %, seguido de la presencia de

manchas con un 26 %. Las costras representaron el 23 % de los defectos identificados, mientras que las magulladuras fueron menos comunes, con un 3 %. Finalmente, el 20 % del porcentaje restante represento a los cladodios en buen estado con ausencia de defectos. Estos valores, no son muy prometedores si se piensa comercializar este cactus a futuro, esto debido a que los aspectos visuales juegan un papel importante entre los consumidores, a la hora de adquirir un producto (Codex, 1993). De un total de 300 cladodios analizados, el 38 % presentaba ocho areolas (lugar en dónde emergen las

espinas en un cactus), el 32,4 % presentaba siete areolas, el 16,7 % tenía seis, el 12 % nueve y solo el 1 % presentaba dos areolas.

Respecto al color de los cladodios, se identificaron dos variantes principales, el verde ligero atribuido a el 54,6 % de las muestras y el verde soldado correspondiente al 45,4 % restante. Los datos anteriores pueden ser relevante para la clasificación a nivel de calidad y comercialización de los cladodios.

Tabla 1

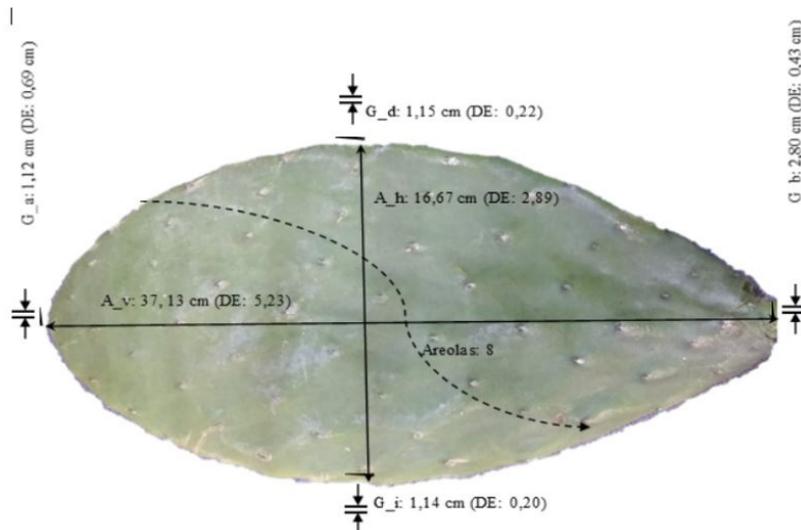
Análisis descriptivo de las medidas morfométricas de los cladodios de nopal

VARIABLES	Media	Error estándar de la media	Mediana	Desviación estándar	Varianza	Rango	Mínimo	Máximo
w	581,4	19,1	551	198,51	39407,57	860	204	1064
A_v	37,13	0,5	37	5,23	27,43	26	24	50
A_h	16,64	0,28	16,55	2,89	8,37	15	8	23
G_d	1,15	0,02	1,1	0,22	0,05	1,3	0,5	1,8
G_i	1,14	0,02	1,1	0,2	0,04	1	0,6	1,6
G_a	1,13	0,07	1,1	0,69	0,48	7,5	0,5	8
G_b	2,8	0,04	2,8	0,43	0,19	1,75	2	3,75
Areo	7,43	0,09	7,5	0,96	0,92	4	5	9

Nota. w: peso en gramos. Longitud, ancho y grosor en centímetros. Longitud del eje vertical (A_v), el ancho del eje horizontal (A_h), el grosor derecho (G_d), el grosor izquierdo (G_i), el grosor apical (G_a), el grosor de la base (G_b) y el número de hileras de areolas en una cara del cladodio (Areo).

Figura 1

Descripción de las medidas morfométricas tomadas al cladodio de nopal



Análisis de Correlación

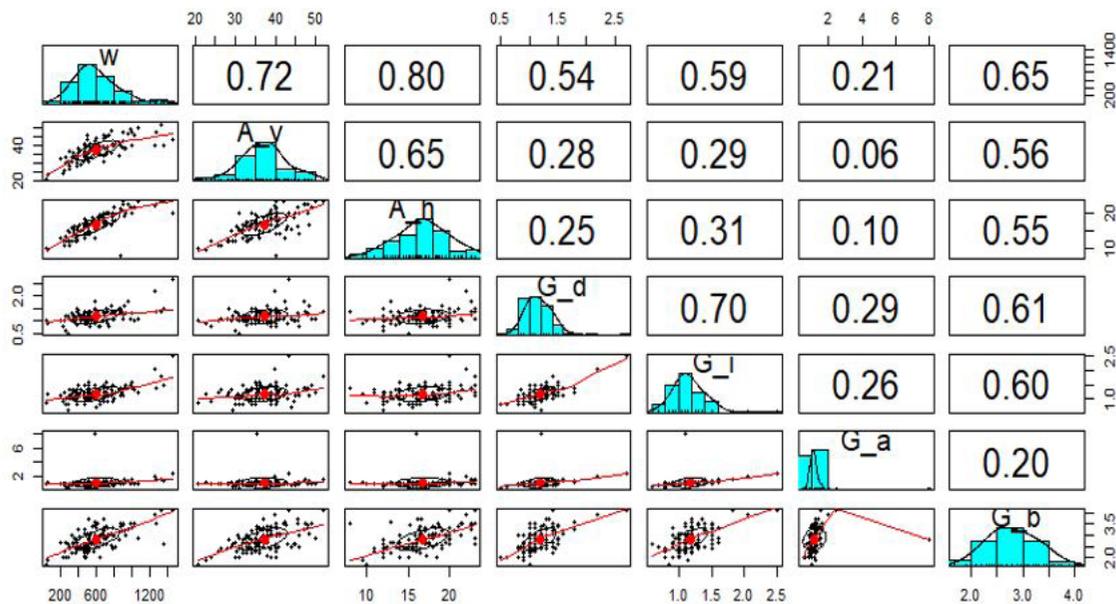
En la **Figura 2**, se aprecia la matriz de dispersión, el histograma y la correlación entre las variables de los cladodios de nopal, calculados a partir de los datos tabulados de las medidas morfométricas. La correlación positiva fuerte (0,80) entre el peso (*w*) y el ancho del eje horizontal (*A_h*) sugiere que, en general, a medida que aumenta el peso de los cladodios, tiende a aumentar su ancho horizontal. Del mismo modo, la correlación positiva fuerte (0,72) entre el peso y la longitud del eje vertical (*A_v*) indica que los cladodios tienden a ser más largos a medida que aumenta su peso. La correlación moderada y positiva (0,70) entre el grosor derecho (*G_d*) y el grosor izquierdo (*G_i*) sugiere que estos

dos atributos tienden a estar relacionados. Esto guarda relación con el hecho de que se evaluarán dos medidas de grosor en lados opuestos de un cladodio.

El que todas las variables tengan al menos un coeficiente de correlación significativo ($p < 0,05$) indica que existe una relación entre varias de estas características morfométricas. Estas correlaciones pueden ser importantes para comprender cómo estas características morfométricas se relacionan entre sí. Por otra parte, las medidas morfométricas que presentaron una distribución normal según la prueba de Kolmogórov-Smirnov fueron: *w* (KS = 0,77, $p = 0,12$), *A_v* (KS = 0,75, $p = 0,16$) y *A_h* (KS = 0,70, $p = 0,20$).

Figura 2

Matriz de las medidas de dispersión histograma y correlación de los cladodios de nopal



Nota. *w*: peso. Longitud del eje vertical (*A_v*), el ancho del eje horizontal (*A_h*), el grosor derecho (*G_d*), el grosor izquierdo (*G_i*), el grosor apical (*G_a*), el grosor de la base (*G_b*)

Los resultados de este estudio coinciden con los de Lucena *et al.*, quienes analizaron 1018 cladodios de nopal de la especie *N. cochenillifera* en la región de Pernambuco, Brasil, encontrando que hay una correlación directa entre el peso y la medida de la longitud del eje horizontal

y ancho del cladodio ($r = 0,82$) (de Lucena *et al.*, 2020). También son consistentes con lo reportado por Alkhtib *et al.* (2023), quienes analizaron 100 cactus de la especie *Opuntia ficus-indica* y emplearon mediciones morfométricas correspondientes a (ancho, largo y grosor),

encontrando que había una relación fuerte entre la morfometría del cladodio y su peso ($r > 0,7$; $p < 0,001$) (Alkhtib *et al.*, 2023).

Análisis factorial

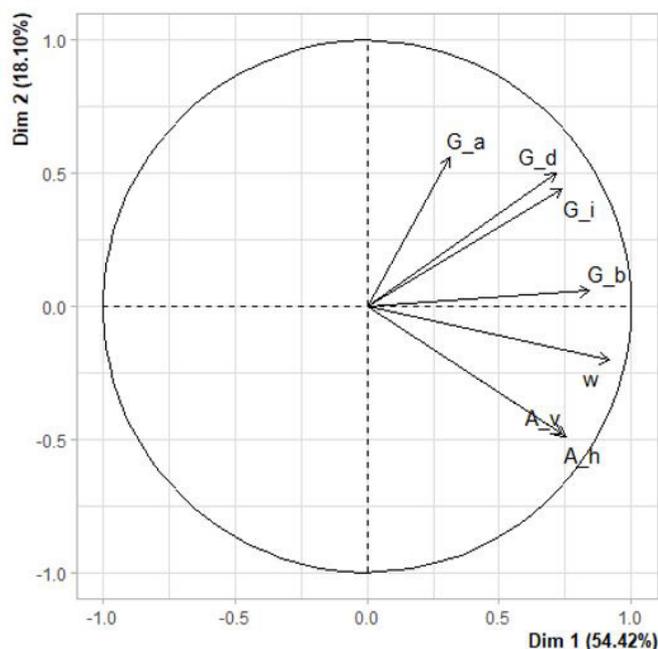
Con el objetivo de reducir la dimensionalidad de las medidas morfométricas y explorar patrones subyacentes se realizó un Análisis Factorial de Componentes Principales (A.F.C.P.) en los datos recopilados. La Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de adecuación de muestreo fue de 0,72, lo cual indica que la suma de los coeficientes de correlación parcial al cuadrado es aceptable, por lo tanto, el análisis factorial de componentes principales es un procedimiento viable. La prueba de esfericidad de Bartlett $X^2(21) = 318,08$, $p < 0,00$, mostro la existencia de verdaderos componentes principales en los datos.

La inercia de las primeras dimensiones indica la existencia de relaciones sólidas entre las variables y señala el número de dimensiones a estudiar. Para una mejor comprensión de

la estructura de las variables, aplicamos una rotación varimax cuyos resultados se presentan en la **Figura 3**. La Dimensión 1 (Dim 1) corresponde al primer componente principal (CP1) y explica el 54,4 % de la variabilidad total de los cladodios de nopal. Este alto porcentaje indica que el primer componente captura una parte significativa de la variabilidad de los datos, y este factor incluye las variables Peso (w), Ancho del eje vertical (A_v) y Ancho del eje horizontal (A_h). La Dimensión 2 (Dim 2) representa el segundo componente principal (CP2), que explica el 18,1 % de la variación total. Este componente constituye un segundo factor que agrupa las variables Grosor derecho (G_d), Grosor izquierdo (G_i), Grosor apical (G_a) y Grosor de la base (G_b). En conjunto, Dim1 y Dim2 explican el 72,5 % de la variación en los cladodios de nopal, ya que sus autovalores son mayores que 1. Los otros componentes, CP3, CP4, CP5 y CP6, explican el 11,6 %, 5,5 %, 4,62 % y 4,1 %, respectivamente. En su totalidad, en conjunto todos los componentes explican el 98,5 % de la variabilidad total.

Figura 3

Gráfica de los componentes principales de los cladodios de nopal



Como se puede observar en la **Tabla 2**, los datos indican que el Factor 1 está relacionado con las dimensiones que influyen en el tamaño y el

peso, mientras que el Factor 2 está asociado con el grosor de los cladodios del nopal.

Tabla 2

Análisis descriptivo de las medidas morfométricas de los cladodios de nopal

Matriz de componente rotado		
	CP1	CP2
W	0,89	0,26
A_h	0,84	0,61
A_h	0,89	-0,02
G_d	0,16	0,82
G_i	0,19	0,77
G_a	-0,07	0,47
G_b	0,56	0,61

Análisis bromatológico

La caracterización bromatológica realizada a la harina de nopal (*Opuntia ficus-indica*) se describe a continuación. En cuanto a la variable humedad, se obtuvo un porcentaje igual al 11,7 %, lo que indica que la harina tiene un contenido moderado de agua. La ceniza representa un 15,4 % del peso total de la harina, lo que sugiere la presencia de minerales y otros compuestos inorgánicos. La grasa es relativamente baja, con un 2,3 %, lo que hace que la harina sea una fuente alimenticia baja en grasas. La concentración de proteína en la harina fue de 6,2 %, lo que indica la presencia de una cantidad moderada de proteínas, convirtiéndola en un alimento interesante desde el punto de vista nutricional. La fibra cruda se encuentra en una cantidad apreciable del 8,2 %, lo que sugiere que esta harina puede ser beneficiosa para la salud digestiva y tener aplicaciones en la industria alimentaria.

Los carbohidratos totales son la principal fuente de energía presente en la harina de nopal, representando un 64,22 % de su composición. Cada 100 gramos de nopal aportan aproximadamente 302,75 kilocalorías, lo que significa que es una fuente moderada de energía.

El nopal es una excelente fuente de calcio, con una concentración de 2032 mg por cada 100 gramos de muestra, lo que lo convierte en un alimento importante para mantener la salud de los huesos (Sáenz *et al.*, 2006)). La acidez del nopal, medida como ácido málico, es baja, con un nivel del 0,12 %, lo que sugiere que tiene un sabor suave y no muy ácido.

Estos análisis bromatológicos demuestran que la harina de nopal obtenida a partir del cultivo artesanalmente de *Opuntia ficus-indica* en la región del Caño del Chicamocha en Santander tiene un equilibrio nutricional valioso destacado por su contenido en proteínas y calcio, además de representar una fuente moderada de energía y fibra. Los resultados de este análisis bromatológico son consistentes con investigaciones previas sobre la composición nutricional de la harina de nopal. Según Sáenz *et al.* (2006) las características químicas y físicas de la harina de nopal varían dependiendo del origen de la muestra ya sea a partir de brotes nuevos, la penca o de tallos suberificados, otros factores que pueden influir se relacionan con la edad (0,5, 1, 2, 3 y 4 años) y la especie. Adicionalmente, Sáenz *et al.*, 2006, citando a Flores (1995), señalan que la composición química en 20 variedades de nopal analizando los cladodios de los cuales se

obtuvo harina presentaron variaciones a nivel de: proteínas (2,5 % a 9,4 %), grasa (1 % a 1,67 %), fibra cruda (8,0 % a 17,5 %), cenizas (13,2 % a 21 %), y acidez (0,08 %) (Flores *et al.*, 1995; Porras *et al.*, 2018; Sáenz *et al.*, 2006).

De acuerdo con el estudio realizado por Castillo *et al.* (2013) la composición química de la harina de nopal (g/100g en base seca) de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., presentó diferencias con los datos obtenidos en esta investigación en cuanto a la concentración de carbohidratos totales (16,3 %), proteína (12,6 %), grasa (3,0 %), cenizas (20,2 %), calcio (334 mg/100g) y los valores de fibra que fueron superiores para ellos (Castillo *et al.*, 2013). En la República Dominicana, en las regiones suroeste y nordeste, se cultiva *Opuntia ficus-indica* (L.), subgénero *Platyopuntia* en zonas áridas y semiáridas de forma silvestre. En estas regiones, se procesaron cactus en diferentes etapas de desarrollo, incluyendo los estados de tierno, semitierno, lleno y fruto, para obtener harina. El análisis bromatológico reveló valores más bajos de agua (9 %), grasa (0,02 %), carbohidratos totales (58 %) y calcio (9 %) en comparación con el estudio previo realizado en cactus de la Mesa de los Santos (Santander, Colombia) con cladodios de mayor edad. Sin embargo, se observó un mayor contenido de proteínas (8 %) (IIBI, s.f.). En un estudio llevado a cabo en Ecuador, se examinó la sustitución parcial de la harina de trigo en la elaboración de pan por harina de Nopal (*Opuntia ficus-indica*). Los resultados obtenidos mostraron valores diferentes en comparación con el presente estudio, particularmente en los niveles de humedad (6 %), grasa (0,02 %), calcio (310 mg), acidez (0,2 %), carbohidratos totales (18 %), y concentraciones más altas de ceniza (16 %), fibra cruda (48 %) y proteínas (10 %) confirmando que el nopal es una fuente importante de fibra y calcio (Cando & Gallardo, 2020).

Es importante destacar la variabilidad en los datos observados en nuestro análisis tanto en la composición química como en la composición

física de la harina *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Este hecho se ratifica con la investigación de Ö-Zcan & Al Juhaimi, 2011 quienes señalan que la composición bromatológica de la harina de nopal podría estar influenciada por factores como la parte del cactus a analizar y fase de desarrollo de la verdura dado que a medida que envejece y los cladodios maduran, tienden a aumentar los contenidos de acidez, carbohidratos y carotenos en la harina, mientras que disminuyen los contenidos de proteína y fibra cruda.

Además de considerar los aspectos bromatológicos mencionados en este estudio, consideramos necesario abordar en investigaciones futuras el análisis de las características fenológicas relacionadas con el clima, como lo son: la temperatura, la radiación y la humedad, así como un análisis de las propiedades químicas del suelo en cada región de cultivo, para comprender la incidencia en la biología del cactus (Paucara & Del Castillo, 2021). Posteriormente, se podrían establecer correlaciones entre estos hallazgos y las propiedades fisicoquímicas de la harina de nopal. La comprensión de los cambios atribuidos a diversos factores ambientales y externos servirán para entender la biología de la especie y su influencia en el valor nutricional de la harina de nopal. Esto, a su vez, proporcionaría información valiosa para su potencial aplicación en la industria alimentaria y en la nutrición, tanto humana como animal.

Análisis microbiológico

Los resultados microbiológicos en cierta medida evidencian las buenas prácticas de manipulación que se realizaron a los cladodios de nopal en esta investigación, de acuerdo con la Organización Internacional de Normalización (ISO) 4833-1:2013 (ISO, 2013) de los microorganismos aerobios mesófilos se encontraron 100 UFC/g (Unidades Formadoras de Colonias por gramo) en la harina de nopal. Esto está por debajo del límite permitido de 150,000 UFC/g ISO 4833-1:2013 (ISO, 2013).

Este resultado sugiere que la harina de nopal tiene una carga bacteriana baja de microorganismos mesófilos, lo que es positivo desde el punto de vista de la seguridad alimentaria. Para los Coliformes Totales, se detectaron menos de 3 NMP/g (Números Más Probables por gramo) de coliformes totales en la harina de nopal (ISO, 2013). La presencia de coliformes totales a niveles tan bajos es un buen indicador de la higiene durante la producción y procesamiento de la harina. Esta observación fue similar a lo reportado por Castillo *et al.* (2013) donde el recuento de Coliformes Totales fue negativo, garantizándose la inocuidad de la harina de nopal empleada en la formulación de alfajores de alto contenido en fibra.

También se analizó la presencia de *Escherichia coli* y se encontraron menos de 3 NMP/g, (por debajo del límite permitido de 3 NMP/g) (ISO, 2013). Al igual que los coliformes totales, los niveles bajos de *E. coli* indican que no existe contaminación fecal en las muestras analizadas. Estos resultados son similares a lo reportado por Castillo *et al.* (2013) quienes realizaron un estudio microbiológico en harina de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., señalando como negativo el recuento total de colonias y coliformes; esto último debido a la metodología usada en el proceso de secado (Castillo *et al.*, 2013).

Respecto a los mohos y levaduras, se encontraron valores iguales a 2,000 UFC/g en la harina de nopal. Esta cantidad está fuera del rango de 3,000 a 5,000 UFC/g, que es el límite permitido (ISO, 2013). Los valores obtenidos indican una contaminación mínima de la muestra, incluso por debajo de los límites permitidos. Esto sugiere una cuidadosa manipulación de las muestras durante el estudio.

Complementando esta discusión, consideramos es fundamental prevenir el deterioro y mantener la calidad los cladodios o tunas, especialmente durante el proceso de

corte, dado su alto riesgo de ser afectados por hongos, levaduras y bacterias patógenas que suelen encontrarse en el nopal debido a su baja acidez y alto contenido de azúcares (FAO, 2018); por lo tanto, es esencial preservar la calidad nutricional del producto y evitar la proliferación de agentes nocivos que podrían comprometer su integridad. Para una futura producción industrial de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en esta región del país, se debe promover entre los cultivadores la implementación de buenas prácticas de cosecha y postcosecha.

Adicionalmente, se analizó la presencia de *Salmonella* sp, reportándose como ausente en las muestras de harina procesadas siendo este un resultado positivo si se desea impulsar el uso de esta materia prima. La determinación de este microorganismo es importante porque estudios como el realizado por Landa *et al.*, (2013), demuestran que *S. Typhimurium* puede persistir hasta por 14 días en el suelo de cultivo, así como colonizar la superficie y tejidos internos. Por lo tanto, se destaca la importancia de asegurar que los cladodios se mantengan en condiciones fisiológicas óptimas.

Finalmente, los resultados obtenidos para los análisis microbiológicos muestran que la harina de los nopales recolectados en la vereda Regadero Bajo de la Mesa de los Santos – Santander (Colombia), por seguir las buenas prácticas de manufactura cumple con los parámetros de calidad exigidos en los reglamentos sanitarios para alimentos, de acuerdo con normas nacionales e internacionales (ISO, 2008, 2013, 2020; NTC, 2009).

Limitaciones del estudio

Una de las principales limitaciones de este estudio radica en la falta de conocimiento sobre la edad exacta de los cultivos de nopal. Esto se debe principalmente a que el cultivo de nopal en la región se realiza de manera artesanal y no tecnificada. La falta de información precisa

sobre la edad de los nopales podría influir en las variaciones observadas en la composición de los cladodios y, por lo tanto, en los resultados del análisis bromatológico y morfométrico (Sáenz *et al.*, 2006). Futuros estudios deberán abordar esta limitación mediante métodos de registro y seguimiento más precisos de la edad de las plantas de nopal en diferentes etapas de crecimiento.

Es importante destacar que este proyecto se llevó a cabo en una única región geográfica, lo que significa que se trabajó con un solo cultivo de nopal distribuido en varios sectores. Esta limitación geográfica pudo influir en la representatividad de los resultados. Para investigaciones futuras, se recomienda abordar esta limitación ampliando el alcance geográfico del estudio (FAO, 2018; Sáenz *et al.*, 2006). Esto implica la inclusión de cultivares de nopal de diferentes regiones geográficas, lo que permitirá evaluar si las características morfométricas y la composición nutricional varían significativamente en función de la ubicación geográfica (FAO, 2018; Flores *et al.*, 1995). Además, sería relevante incorporar análisis genéticos de filogenia para comprender mejor la diversidad genética y la posible ancestralidad de los cultivares de nopal en diferentes regiones (FAO, 2018).

Componente Social

A nivel social y académico, el proyecto tuvo impactos positivos a nivel de la comunidad. Se llevó a cabo un concurso de cocina enfocado en la preparación de alimentos destacando el nopal, como ingrediente principal. Este evento contó con la participación de estudiantes del programa de Tecnología en Gestión Gastronómica de la Universidad Autónoma de Bucaramanga y culminó con la creación de una cartilla culinaria que incluye recetas gastronómicas (Ramírez Castaño *et al.*, 2022). A su vez, los ganadores del concurso brindaron capacitación sobre el cultivo y el aprovechamiento del nopal desde

una perspectiva gastronómica, a madres de familia dedicadas al cultivo de nopal en la vereda Regadero Bajo de la Mesa de los Santos, Santander, Colombia, enseñándoles a preparar encurtidos y repostería (Bula-Barbosa, 2019).

Conclusiones

Existe una correlación entre el peso de los cladodios de nopal de la especie *Opuntia ficus-indica* cultivados en el municipio de la mesa de los santos Santander con sus medidas de ancho y longitud. Conocer la correlación entre morfometría y peso de los cladodios hace posible el desarrollo de ecuaciones matemáticas a fin de estimar la producción masiva de cactus.

Realizar estudios no invasivos para monitorear el desarrollo de los cultivos de nopal es fundamental para preservar esta planta, que desempeña un papel crucial en el aumento de la biomasa, que impulsa el desarrollo rural debido a sus numerosos usos.

Este estudio proporciona una descripción detallada de las características morfométricas de los cladodios de nopal cultivados en la vereda Regadero Bajo de la Mesa de los Santos – Santander (Colombia). Se destaca la presencia de correlaciones significativas entre estas características y presenta una reducción de dimensionalidad efectiva a través del PCA y la rotación varimax. Estos resultados pueden ser de utilidad tanto para la caracterización de los cladodios como para su clasificación y comercialización en función de sus dimensiones y grosor.

En relación con los análisis bromatológicos, se puede concluir que los resultados son consistentes con investigaciones previas sobre la composición nutricional de la harina de la especie *Opuntia ficus*. Es importante destacar que algunos de los cambios observados en la

composición con respecto a otros estudios pueden atribuirse a factores como la fase de desarrollo del cactus (edad). Además, sería beneficioso estudiar los aspectos fenológicos que afectan el cultivo, ya que podrían influir en su valor nutricional, considerando las variaciones observadas en la composición de la harina de nopal. Estos hallazgos resaltan la importancia de la tecnificación del cultivo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Asociación de mujeres campesinas de regadero bajo ASACA, por todo su apoyo y acompañamiento en el proceso de muestreo del producto en sus cultivos. Así como, al laboratorio de Biotecnología de la Universidad de Santander – UDES, quienes amablemente facilitaron algunos equipos para estandarizar el proceso de secado de los cladodios de nopal.

Financiamiento

Los investigadores recibieron financiación de la Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB y a la Universidad CES de Medellín. Lo anterior esta consignado en el acta de inicio N° 62. código 128 de la convocatoria bienal interna 2019 – 2020.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Alkhtib, A., Muna, M., Darag, M., Alkhalid, I., Al-asa'ad, Z., Mfeshi, H., Zayod, R., & Burton, E. (2023). Spineless cactus cladode is a viable replacement to barley and maize grains in the feed rations of dromedary camel calves. *Veterinary Medicine and Science*, 9, 2368–2375. <https://doi.org/10.1002/vms3.1227>
- Association of Official Agricultural Chemists AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis* (17th ed.). Association of Official Analytical Chemists. <https://www.aoc.org/>
- Association of Official Agricultural Chemists AOAC. (2005). *Minerals in infant formula, enteral products, and pet foods. Atomic absorption spectrophotometric method*. Association of Official Analytical Chemists. <https://www.aoc.org/>
- Brinker, F. (2009). Prickly pear as food and medicine. *Journal of Dietary Supplements*, 6(4), 362–376. <https://doi.org/https://doi.org/10.3109/19390210903280280>
- Budinsky, A., Wolfram, R., Oguogho, A., Efthimiou, Y., Stamatopoulos, Y., & Sinzinger, H. (2001). Regular ingestion of opuntia robusta lowers oxidation injury. *Prostaglandins, Leukotrienes, and Essential Fatty Acids*, 65(1), 45–50. <https://doi.org/10.1054/PLEF.2001.0287>
- Bula Barbosa, L. (2019). *Nopal a la colombiana, una receta que alimenta y ayuda a sanar*. Ciencia Abierta UNAB. <https://unab.edu.co/cienciaabierta/nopal-a-la-colombiana-una-receta-que-alimenta-y-ayuda-a-sanar/>
- Cando, K., & Gallardo, L. (2020). Sustitución parcial de la harina de trigo por harina de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la elaboración de pan [Universidad Técnica de Cotopaxi]. In Universidad Técnica de Cotopaxi. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4501/1/PI-000727.pdf>
- Castillo, S., Estrada, L., Margalef, M., & Tóffoli, S. (2013). Obtención de harina de nopal y formulación de alfajores de alto contenido en fibra. *Diaeta*, 31(142), 20–26. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-73372013000100003
- Codex Alimentarius. (1993). *Norma mundial del Codex Stan 185 para el nopal*. https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/marco/Codex_Alimentarius/normativa/codex/stan/185-1993.PDF
- Corzo-Rios, L., Bautista-Ramírez, M., Gómez y Gómez, Y., & Torres-Bustillos, L. (2016). Frutas de cactáceas: Compuestos bioactivos y sus propiedades nutraceuticas. In M. E. Ramírez Ortiz (Ed.), *Alimentos Funcionales de Hoy* (pp. 35–66). OmniaScience. <https://doi.org/10.3926/oms.360>
- De Mello, M., Rodrigues de Lucena, L., Melo de Oliveira, A., Chagas, de L. C., Queiroz dos Anjos, F., Masterson de Farias, I., Laamon Pinto Simões, V. J., & Rodrigues de Almeida, M. C. (2020). Cladode area and weight of Nopalea cochenillifera clones as a function of morphometric characteristics. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 22, 18–28. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v22i.15>

- El Kossori, R. L., Villaume, C., El Boustani, E., Sauvaire, Y., & Méjean, L. (1998). Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus-indica* sp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 52(3), 263–270. <https://doi.org/10.1023/A:1008000232406>
- Feugang, J., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F., & Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience: A Journal and Virtual Library*, 11(SUPPL. 2), 2574–2589. <https://doi.org/10.2741/1992>
- Flores, C., de Luna, J., & Ramírez, P. (1995). *Mercado mundial del nopalito*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Gallegos-Vázquez, C., Valdez-Cepeda, R. D., Barrón-Macias, M., Barrientos-Priego, A. F., Andrés-Agustín, J., & Nieto-Ángel, R. (2006). Caracterización morfológica de 40 cultivares de nopal de uso como hortaliza del banco de germoplasma del CRUCEN-UACH. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(1), 41–49. <https://doaj.org/article/74235b40ac3d442c8921d341ef439d86>
- Gouws, C., Georgousopoulou, E., Mellor, D., McKune, A., & Naumovski, N. (2019). Effects of the Consumption of Prickly Pear Cacti (*Opuntia* spp.) and its Products on Blood Glucose Levels and Insulin: A Systematic Review. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 55(5). <https://doi.org/10.3390/medicina55050138>
- Instituto de Innovación en Biotecnología e Industria IIBI. (s.f.). *Harina y derivados del nopal. Fomento del consumo e industrialización para la soberanía alimentaria*. Instituto de Innovación en Biotecnología e Industria (IIBI). <https://www.ideassonline.org/pic/doc/BrochureHarinadeNopal.pdf>
- International Organization for Standardization ISO. (2008). ISO 21527-1:2008 *Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of yeasts and moulds — Part 1: Colony count technique in products with water activity greater than 0,95* (1st ed.). International Organization for Standardization - ISO. <https://www.iso.org/standard/38275.html>
- International Organization for Standardization ISO. (2013). ISO 4833-2:2013 *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the enumeration of microorganisms — Part 1: Colony count at 30 °C by the pour plate technique*. International Organization for Standardization - ISO. <https://www.iso.org/standard/53728.html>
- International Organization for Standardization ISO. (2020). ISO 6579-1:2017/Amd 1:2020 *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the detection, enumeration and serotyping of Salmonella — Part 1: Detection of Salmonella spp. — Amendment 1: Broader range of incubation temperatures, amendment to the stat.* International Organization for Standardization - ISO. <https://www.iso.org/standard/76671.html>
- Kashif, R., D’cunha, N., Mellor, D., Alexopoulos, N., Sergi, D., & Naumovski, N. (2022). Prickly Pear Cacti (*Opuntia* spp.) Cladodes as a Functional Ingredient for Hyperglycemia Management: A Brief Narrative Review. *Medicina*, 58(2). <https://doi.org/10.3390/MEDICINA58020300>
- Landa, P., Hernández, A., Vargas, M., Eslavas, C., Chaidez, C., & Patel, J. (2013). Persistencia de *Salmonella typhimurium* en nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(2), 147–153. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- López, C., Malpica, A., López, J., García, E., & Sol Sánchez, A. (2018). Crecimiento de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en la zona central de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (5), 1005–1014. <https://doi.org/10.29312/remexca.v015.1306>
- Ministerio de la Protección Social MPS. (2011). Resolución Número 333 de 2011 (10 de Febrero de 2011). Ministerio de la Protección Social (MPS). <https://www.minsalud.gov.co/Portada2021/index.html>
- Norma Técnica Colombiana NTC. (2009). *Norma Técnica Colombiana NTC 4516:2009. Microbiología de alimentos y productos de alimentación animal. Método horizontal para la detección y enumeración de coliformes técnica del número más probable*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). <https://www.icontec.org/>
- Norma Técnica Colombiana NTC. (2017). *Norma Técnica Colombiana NTC 1363:2017. Productos de molinería. Pan envasado (empacado)*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). <https://www.icontec.org/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del Nopal. In P. Ingles, J. C. Mondragon, A. Nefzaoui, & C. Sáenz (Eds.), *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)* (Vol. 1). <https://www.fao.org/3/i7628es/i7628es.pdf>
- Ö-Zcan, M., & Al Juhaimi, F. (2011). Nutritive value and chemical composition of prickly pear seeds (*Opuntia ficus-indica* L.) growing in Turkey. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(5), 533–536. <https://doi.org/10.3109/09637486.2011.552569>
- Paucara, C., & Del Castillo, C. (2021). Caracterización física y química de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) en el municipio de Luribay, La Paz – Bolivia. *Revista Estudiantil AGRO-VET*, 5(1 SE-Artículos de Investigación), 5–12. <https://agrovvet.umsa.bo/index.php/AGV/article/view/45>
- Porras, D., Albesiano, S., & Arrieta, L. (2018). El género *Opuntia* (Opuntioideae–Cactaceae)

en el departamento de Santander, Colombia. *Biota Colombiana*, 18(2), 112–132. <https://doi.org/10.21068/C2017.V18N02A07>

Ramírez Castaño, A. P., Alfaro Wisaquillo, Y. M., León, F. J., Avendaño Celis, R. J., Peña Lizcano, C. A., Gómez, L. E., Gómez Rivero, J. S., & Ovalle Gómez, L. M. (2022). *El nopal en Colombia: más que un cactus*. <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/17409>

Sáenz, C., Berger, H., Corrales, J., Galletti, L., García de Cortazar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez-Félix, A., Sepúlveda, E., & Varnero, M. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. In C. Rosell (Ed.), *Boletín de servicios agrícolas de la FAO (Vol. 162)*. FAO. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120301/Utilizacion-agroindustrial-del-nopal.pdf>

Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. de L., & 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.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000500018&lng=es&nrm=iso&tlng=es